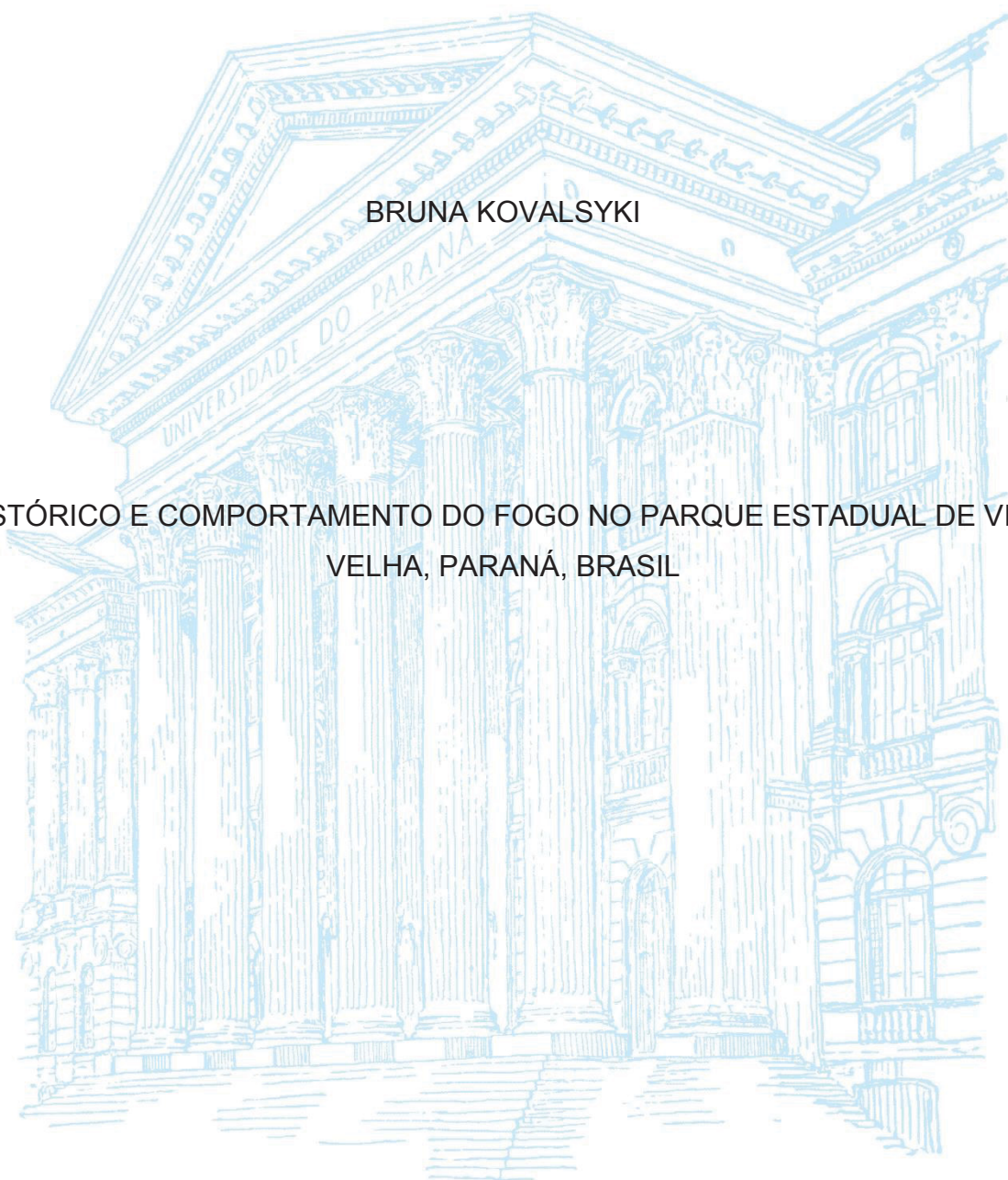


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA KOVALSYKI

HISTÓRICO E COMPORTAMENTO DO FOGO NO PARQUE ESTADUAL DE VILA  
VELHA, PARANÁ, BRASIL



CURITIBA

2020

BRUNA KOVALSYKI

HISTÓRICO E COMPORTAMENTO DO FOGO NO PARQUE ESTADUAL DE VILA  
VELHA, PARANÁ, BRASIL

Tese apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:  
Prof. Dr. Alexandre França Tetto

Coorientadores:  
Prof. Dr. Ronaldo Viana Soares  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marta Regina Barrotto do Carmo

CURITIBA  
2020

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Kovalsyki, Bruna

Histórico e comportamento do fogo no Parque Estadual de Vila Velha,  
Paraná, Brasil / Bruna Kovalsyki. - Curitiba, 2020.

145 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre França Tetto

Coorientadores: Prof. Dr. Ronaldo Viana Soares

Profa. Dra. Marta Regina Barotto do Carmo

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências  
Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Defesa: Curitiba, 29/10/2020.

Área de concentração: Conservação da Natureza.

1. Incêndios florestais - Parque Estadual de Vila Velha (Ponta Grossa,  
PR). 2. Incêndios florestais - Prevenção e controle. 3. Fogo - Parque  
Estadual de Vila Velha (Ponta Grossa, PR). 4. Teses. I. Tetto, Alexandre  
França. II. Soares, Ronaldo Viana. III. Carmo, Marta Regina Barotto do.  
IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.43(816.2)

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
FLORESTAL - 40001016015P0

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **BRUNA KOVALSYKI** intitulada: **HISTÓRICO E COMPORTAMENTO DO FOGO NO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA, PARANÁ, BRASIL**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 29 de Outubro de 2020.

Assinatura Eletrônica  
29/10/2020 16:11:11.0  
ALEXANDRE FRANÇA TETTO  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
30/10/2020 10:28:29.0  
ARLINDO DE PAULA MACHADO NETO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO)

Assinatura Eletrônica  
29/10/2020 21:31:28.0  
MARCOS VINICIUS GIONGO ALVES  
Avaliador Externo (FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS)

Assinatura Eletrônica  
29/10/2020 15:55:01.0  
ANTONIO CARLOS BATISTA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
29/10/2020 14:52:10.0  
ALEXANDRE BEUTLING  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL)



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste projeto. Foram muitos os que me ajudaram, deram apoio e um abraço, me fizeram sorrir...

Agradeço em especial,

À minha família, por todo amor envolvido. Meu porto seguro. Meu refúgio;

Ao meu marido, Lucas Velasco Fuse, por me incentivar, por me acolher e me dar amor. Por me ajudar a crescer, acreditar em mim e que posso ir além, por acreditar no meu potencial. Eu te amo!;

Ao me orientador, Prof. Dr. Alexandre França Tetto, e também parceiro nas ideias científicas mirabolantes - vamos lá! Foi uma longa jornada trabalhando juntos, sempre de porta aberta e disposto a ensinar, acreditando e confiando no potencial de seus orientados;

Ao Prof. Dr. Antonio Carlos Batista, que é uma inspiração e quem admiro. Foi quem me apresentou a área de incêndios florestais e me deu a primeira oportunidade de trabalhar com o tema;

Aos meus coorientadores: Prof. Dr. Ronaldo Viana Soares, quem eu admiro; e Prof. Dr. Marta Regina do Carmo Barroto, quem me recebeu de braços abertos;

Ao Prof. Dr. Alexandre Behling, por me ajudar nas análises estatísticas e dizer que é fácil;

Ao Dr. Celso Darci Seger, pelos ensinamentos de campo;

Aos motoristas da Centran, pelas idas e vindas;

As técnicas mais divas desta universidade: Veruza e Andréia;

Aos funcionários do IAP – Parque Estadual de Vila Velha, em especial aos brigadistas e aos gerentes Juarez e a Ângela, por estarem sempre de portas abertas;

Ao corpo de bombeiros de Ponta Grossa, pelo serviço que prestam a sociedade;

E aos meus amigos, todos.

Aos piromaníacos do laboratório de incêndios e agregados, amigos do cafezinho do laboratório de paisagismo e a galera do laboratório de unidades de conservação, parceiros para todas as horas, desde carpir um aceiro até apagar um incêndio. Vocês são sensacionais galera, de verdade. Vocês são pra vida!

Às meninas do tempo de faculdade, que independente da distância se fazem sempre presentes. Saudade de vocês!

Aos amigos dos tempos de colégio e do tempo de jogar *bets* na rua, que sempre estiveram por perto dizendo que tudo ia ficar bem.

Em especial ao Uninho guerreiro e claro ao Labres, Tiago, Dessa, Tati, Igor, Heitor, Tamara, Fer, Rudolfo, Josamar, Gonzalo... vocês moram no meu coração!

*me levanto  
sobre o sacrifício  
de um milhão de mulheres que vieram antes  
e penso  
o que é que eu faço  
para tornar essa montanha mais alta  
para que as mulheres que vierem depois de mim  
possam ver além*

*-legado*

*-Rupi Kaur*

## RESUMO

A estepe *stricto sensu* é caracterizada como um ecossistema dependente do fogo, sendo o Parque Estadual de Vila Velha (PEVV) a principal e mais antiga unidade de conservação inserida nesta tipologia, na qual foi implementado o Manejo Integrado do Fogo (MIF) em 2014. A fim de auxiliar o planejamento e ação das atividades de MIF, assim como a manutenção desses remanescentes, esta pesquisa teve por objetivo analisar o histórico de fogo do parque, o comportamento do fogo em queimas controladas e o incremento de biomassa em campo e por sensoriamento remoto, assim como definir um modelo combustível de estepe *stricto sensu* para simulação de progresso de fogo e suas variáveis. O histórico de fogo foi levantado no período de 1997 a 2018, por meio de determinação manual de cicatrizes de fogo, em imagens Landsat. As queimas, utilizando a técnica contra o vento, foram realizadas no final de agosto de 2017, para 16 subparcelas de 60 m<sup>2</sup> cada, localizadas em três áreas planas. Nos 19 meses seguintes foi observado o incremento de biomassa. Para tanto, foram realizadas coletas destrutivas de material combustível, categorizando em material combustível fino vivo, morto e miscelânea. O modelo de combustível para estepe *stricto sensu* do PEVV foi definido com base em dados publicados sobre a caracterização de material combustível para a tipologia e comparado com outros modelos pré-existentes. Para tanto, foram realizadas simulações do incêndio transcorrido em 4 de setembro de 2017 por meio do programa FARSITE, comparando 5 distintos arranjos de modelos de combustíveis. Por fim, analisou-se a severidade deste evento por meio do índice espectral *Relativized Burn Ratio* (RBR) e o comportamento do índice espectral *Normalized Burn Ratio* (NBR) pré e pós incêndio, relacionado à caracterização de biomassa. Os meses críticos de ocorrência de incêndio no PEVV foram agosto e setembro. Ao longo de 22 anos, cerca de 19,7% da área do parque foi atingida 3 vezes, enquanto 7,4% da área teve sua última queima registrada há 19 anos. O tempo de retorno de fogo predominante do PEVV foi “misto”. Os valores médios dos parâmetros de comportamento de fogo foram: a) velocidade de propagação: 0,0160 m.s<sup>-1</sup>; b) altura de chama: 1,0 m; c) intensidade de fogo: 34,49 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>; d) calor liberado: 2197,81 kcal.m<sup>-2</sup>; e e) material consumido: 72,3%. Após 19 meses, a carga total de combustível fino foi inferior e a representatividade das classes foi distinta ao observado anteriormente ao experimento. Dos cinco modelos pré-selecionados simulados, três foram analisados quanto aos parâmetros de comportamento do fogo, sendo que os valores médios de velocidade de propagação, comprimento de chama, intensidade de fogo e calor liberado, para cada modelo, foram, respectivamente: a) 2-4-8 (0,0720 m.s<sup>-1</sup>; 1,19 m; 137,24 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>; 1566,47 kcal.m<sup>-2</sup>), b) 109-143-161 (0,0672 m.s<sup>-1</sup>, 1,69 m, 274,69 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>, 3589,44 kcal.m<sup>-2</sup>) e c) 14-4-8 (0,0987 m.s<sup>-1</sup>, 1,79 m, 261,09 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>, 2495,50 kcal.m<sup>-2</sup>). Referente à severidade do incêndio florestal, 78,7% da área atingida (total de 124 ha) foi classificada como moderada-baixa severidade e, segundo o índice RBR, houve considerável redução dos efeitos resultantes do fogo nos 19 meses após o incêndio, para o estrato herbáceo. Os dados obtidos foram condizentes com os existentes na literatura. Dentre os modelos de combustível apresentados, o modelo 14 demonstrou bom desempenho e representatividade do evento. Assim, as informações obtidas no presente estudo poderão auxiliar no planejamento e execução do MIF do Parque Estadual de Vila Velha.

Palavras-chave: Campos Gerais, unidades de conservação, incêndios florestais, queima controlada, vegetação campestre, manejo do fogo

## ABSTRACT

Grassland is a fire-dependent ecosystem and Vila Velha State Park (VVSP) is the main and oldest protected area inserted in this typology, where an Integrated Fire Management (IFM) was implemented in 2014. In order to assist the planning and action of the IFM activities, and the maintenance of these remnants, this research aimed to analyze the fire history of the park, the fire behavior in controlled burns, forest fire simulation and the biomass regeneration by remote sensing. We analyzed the fire history between 1997 and 2018 through manual determination of fire scars in Landsat images. For the analysis of fire behavior, we carried out burns against the wind at the end of August 2017, in 16 plots of 60 m<sup>2</sup> distributed in three flat areas. In the following 19 months, we monitored biomass regeneration with destructive collections of combustible material. We categorized this material into thin, living, dead and miscellaneous fuel material. We defined the fuel model for VVSP grassland based on published data on the characterization of combustible material for the typology and compared with other pre-existing models. For this purpose, we simulated the fire occurred on 4<sup>th</sup> September 2017 through the FARSITE program. Finally, we analyzed the severity of this event using the Relativized Burn Ratio (RBR) spectral index and the behavior of the pre and post fire Normalized Burn Ratio (NBR) spectral index related to the biomass characterization. The critical months of fire occurrence in the VVSP were August and September. Over 22 years, about 19.7% of the grassland area was reached three times and 7.4% of the area had its last burn recorded 19 years ago. The predominant fire return time for VVSP was "mixed". The average values of the fire behavior parameters were: a) rate of spread: 0.0160 m.s<sup>-2</sup>; b) flame height: 1.0 m; c) fire intensity: 34.49 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>; d) released heat: 2197, 81 kcal.m<sup>-2</sup>; and e) consumed material: 72.3%. After 19 months, the total load of fine fuel was lower and the representativeness of the classes was different from that observed before the experiment. Of the five pre-selected models, three were subjected to simulation. The average values of rate of spread, flame length, fire intensity and heat released, respectively for each model, were: a) 2-4-8 (0.072 m.s<sup>-1</sup>; 1.19 m; 137.24 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>; 1566.47 kcal.m<sup>-2</sup>), b) 109-143-161 (0.0672 m.s<sup>-1</sup>, 1.69 m, 274.69 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>, 3589.44 kcal.m<sup>-2</sup>) and c) 14-4-8 (0.0987 m.s<sup>-1</sup>, 1.79 m, 261.09 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>, 2495.50 kcal.m<sup>-2</sup>). Regarding the severity of the forest fire, 78.7% of the affected area (about 124 ha) was classified as moderate-low severity and, according to the RBR index, there was a considerable reduction in the effects resulting from the fire in the 19 months after the fire, to the herbaceous layer. The data obtained were consistent with those found in the literature. Among the fuel models presented, model 14 demonstrated good performance and representativeness of the event. Thus, the information obtained in the present study may come to assist in the planning and execution of the IFM of the Vila Velha State Park.

Keywords: Campos Gerais, protected areas, forest fires, burned, grassland, fire management



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 –	LOCALIZAÇÃO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA.....	36
FIGURA 2 –	HIDROLOGIA DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA.....	38
FIGURA 3 –	ALTIMETRIA (A) E DECLIVIDADE (B) DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA.....	39
FIGURA 4 –	GEOLOGIA DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA.....	39
FIGURA 5 –	COBERTURA E USO DO SOLO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA.....	41
FIGURA 6 –	ZONAS DE USO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA.....	42
FIGURA 7 –	ESQUEMA PARA OBTENÇÃO DA SEQUÊNCIA DE RETORNO DE FOGO.....	44
FIGURA 8 –	LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO PARA REALIZAÇÃO DE QUEIMAS.....	45
FIGURA 9 –	VEGETAÇÃO DE ESTEPE <i>stricto sensu</i> (CAMPOS SECOS) DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA.....	46
FIGURA 10 –	CROQUI DAS PARCELAS DESTINADAS À QUEIMA.....	47
FIGURA 11 –	ABERTURA DE ACEIROS TEMPORÁRIOS.....	47
FIGURA 12 –	REALIZAÇÃO DAS QUEIMAS CONTROLADAS.....	48
FIGURA 13 –	COLETA DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO.....	48
FIGURA 14 –	REALIZAÇÃO DAS QUEIMAS CONTROLADAS CONTRA O VENTO COM USO DE PINGA-FOGO (A) E OBTENÇÃO DE ALTURA DE CHAMA (B).....	50
FIGURA 15 –	ACOMPANHAMENTO DA VELOCIDADE DO VENTO (A) E OBTENÇÃO DO SEU SENTIDO POR MEIO DE BIRUTA (B).....	51
FIGURA 16 –	SUBPARCELAS PÓS-QUEIMA (A) E COLETA DE MATERIAL RESIDUAL (B).....	51
FIGURA 17 –	CROQUI DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL.....	53

FIGURA 18 –	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO: DELIMITAÇÃO DA PARCELA (A); SEPARAÇÃO DO MATERIAL VIVO E MORTO (B); RETIRADA DE MISCELÂNEA (C); E OBTENÇÃO DA MASSA TOTAL PARA CADA CLASSE (D).....	54
FIGURA 19 –	OBTENÇÃO DA MASSA ÚMIDA DE AMOSTRA DE COMBUSTÍVEL (A); SECAGEM EM ESTUFA DO MATERIAL (B); E OBTENÇÃO DA SUA MASSA SECA (C)...	55
FIGURA 20 –	PERÍMETRO DA ÁREA ATINGIDA PELO INCÊNDIO FLORESTAL DE 4 DE SETEMBRO DE 2017 E O PONTO INICIAL DE IGNIÇÃO.....	59
FIGURA 21 –	JANELA DO PROGRAMA FLAMMAP PARA GERAR AQUIVO BASE DE SIMULAÇÃO (LCP).....	60
FIGURA 22 –	ESQUEMA DAS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS INTRODUZIDAS NO FLAMMAP .....	61
FIGURA 23 –	CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFIAS DA ÁREA DE OCORRÊNCIA DO INCÊNDIO DE 4 DE SETEMBRO DE 2017 NO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA.....	62
FIGURA 24 –	CLASSES DE COBERTURA DE COPA PARA O PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA.....	63
FIGURA 25 –	REPRESENTAÇÃO DAS TIPOLOGIAS UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO: CAMPO SECO (A); CAPOEIRA (B); E FLORESTA OMBRÓFILA MISTA (C).....	63
FIGURA 26 –	ESPACIALIZAÇÃO DOS MODELOS COMBUSTÍVEIS PARA A ÁREA DE ESTUDO.....	64
FIGURA 27 –	CONJUNTO DOS MODELOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS PARA SIMULAÇÃO.....	65
FIGURA 28 –	IMAGENS SENTINEL PRÉ (A) E PÓS (B) INCÊNDIO PARA O PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA (R:12; G:11; B:8A).....	67
FIGURA 29 –	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA ELABORADA EM GRAPHBUILD DE ETAPAS E PROCESSOS EXECUTADOS EM BATCH PROCESSING.....	68

FIGURA 30 – CROQUI DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO APÓS INCÊNDIO.....	72
FIGURA 31 – QUANTIDADE DE CICATRIZES E ÁREA QUEIMADA, DE INCÊNDIOS FLORESTAIS E DE QUEIMA CONTROLADA, PARA O PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA NO PERÍODO DE 1997 A 2018, REPRESENTADO DE FORMA ANUAL (A) E MENSAL (B).....	74
FIGURA 32 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE FOGO (A) E ÁREA QUEIMADA (%) POR FREQUÊNCIA DE FOGO (B), PARA O PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA NO PERÍODO DE 1997 A 2018.....	77
FIGURA 33 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE TEMPO DESDE A ÚLTIMA QUEIMA (A) E ÁREA QUEIMADA (%) POR TEMPO DESDE A ÚLTIMA QUEIMA (B), PARA O PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA NO PERÍODO DE 1997 A 2018.....	79
FIGURA 34 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE INTERVALO DE RETORNO DE FOGO PARA O PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA NO PERÍODO DE 1997 A 2018.....	80
FIGURA 35 – RELAÇÃO ENTRE ALTURA DA CHAMA (cm) E VELOCIDADE DO VENTO ( $m.s^{-1}$ ).....	87
FIGURA 36 – ACOMPANHAMENTO DE INCREMENTO DE BIOMASSA EM UM PERÍODO DE 19 MESES.....	91
FIGURA 37 – REGENERAÇÃO DE HERBÁCEAS SETE DIAS (A) E 20 DIAS (B) APÓS A PERTURBAÇÃO DO FOGO E SEM OCORRÊNCIA DE CHUVA.....	93
FIGURA 38 – SENTIDO (A) E VELOCIDADE DO VENTO ( $m.s^{-1}$ ) (B) PARA O PERÍODO DAS 11H ÀS 23H.....	96
FIGURA 39 – TEMPERATURA DO AR ( $^{\circ}C$ ) E UMIDADE RELATIVA DO AR (%) PARA O DIA 4 DE SETEMBRO DE 2017, COM DESTAQUE PARA O PERÍODO DAS 11H ÀS 23H.....	97

FIGURA 40 –	PERÍMETRO E PROGRESSÃO HORÁRIA SIMULADOS PARA CINCO ARRANJOS DE MODELOS DE COMBUSTÍVEIS.....	98
FIGURA 41 –	ÁREA SIMULADA (HA) A CADA HORA (A); E ÁREA SIMULADA ACUMULADA (HA) (B), NO PERÍODO DE 13H PARA CINCO ARRANJOS DE MODELOS DE COMBUSTÍVEIS.....	99
FIGURA 42 –	PERÍMETRO E PROGRESSÃO HORÁRIA SIMULADOS PARA QUATRO ARRANJOS DE MODELOS DE COMUSTÍVEIS AJUSTADOS.....	101
FIGURA 43 –	ÁREA SIMULADA (HA) A CADA HORA (A); E ÁREA SIMULADA ACUMULADA (HA) (B), NO PERÍODO DE 13H PARA QUATRO ARRANJOS DE MODELOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS.....	102
FIGURA 44 –	ESPACIALIZAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO ( $\text{m.s}^{-1}$ ) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS.....	104
FIGURA 45 –	ESPACIALIZAÇÃO DO COMPRIMENTO DE CHAMA (m) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS.....	106
FIGURA 46 –	ESPACIALIZAÇÃO DA INTENSIDADE DA LINHA DE FOGO ( $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS.....	108
FIGURA 47 –	ESPACIALIZAÇÃO DO CALOR LIBERADO POR ÁREA ( $\text{kcal.m}^{-2}$ ) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS.....	111
FIGURA 48 –	SEVERIDADE DO INCÊNDIO FLORESTAL, POR RELATIVIZED BURN RATIO (RBR).....	114
FIGURA 49 –	ANÁLISE MULTITEMPORAL DE VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS E MÍNIMOS DE NBR PARA ÁREA DE INCÊNDIO EM ESTEPE DO PEVV.....	116

## LISTA DE TABELAS

TABELA – 1	CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMBUSTÍVEL HERBÁCEO PARA ESTEPE <i>stricto sensu</i> PARANAENSE.....	31
TABELA – 2	VALORES HISTÓRICOS DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS PARA PONTA GROSSA – PR.....	37
TABELA – 3	LIMITES RECOMENDADOS PARA AS VÁRIÁVEIS AMBIENTAIS PARA A EXECUÇÃO DE QUEIMAS CONTROLADAS.....	49
TABELA – 4	MODELO DE COMBUSTÍVEL INSERIDO NO FARSITE PARA ESTEPE <i>stricto sensu</i> .....	57
TABELA – 5	PORCENTAGEM DE MATERIAL HERBÁCEO VIVO CONSIDERADO COMO SECO SEGUNDO O SEU TEOR DE UMIDADE.....	58
TABELA – 6	MODELOS DE COMBUSTÍVEIS SELECIONADOS PARA TIPOLOGIA CAMPESTRE.....	58
TABELA – 7	QUANTIDADE DE MATERIAL COMBUSTÍVEL POR CLASSE PARA OS MODELOS DE INTERESSE.....	64
TABELA – 8	TABELA DE CONTINGÊNCIA.....	66
TABELA – 9	CÁLCULOS DA TABELA DE CONTINGÊNCIA.....	66
TABELA – 10	CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE SEVERIDADE PARA dNBR.....	70
TABELA – 11	IMAGENS SENTINEL OBTIDAS NO PERÍODO DE 2016 A 2019.....	71
TABELA – 12	QUANTIDADE DE CICATRIZES DE INCÊNDIOS E SUA REPRESENTATIVIDADE (%) POR CLASSES DE TAMANHO, PARA O PERÍODO DE 1997 A 2018, PARA O PEVV.....	75
TABELA – 13	MÉDIA DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS DIÁRIAS PARA PONTA GROSSA.....	81
TABELA – 14	VALORES METEOROLÓGICOS REFERENTES AO INÍCIO E FINAL DE CADA QUEIMA.....	82



TABELA – 15	MÉDIA DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS POR PARCELA.....	83
TABELA – 16	VALORES MÍNIMOS, MÉDIOS E MÁXIMOS DAS CARACTERÍSTICAS E CONSUMO DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO POR ÁREA EXPERIMENTAL.....	84
TABELA – 17	MÉDIAS DAS CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL COMBUSTÍVEL E DOS PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO DO FOGO POR SUBPARCELA DE QUEIMA.....	86
TABELA – 18	CÁLCULO DA SUFICIÊNCIA AMOSTRAL (N) PARA AS CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO (MASSA ÚMIDA).....	89
TABELA – 19	CARGA MÉDIA ( $\text{Mg.ha}^{-1}$ ), COMPARAÇÃO DE MÉDIAS E REPRESENTATIVIDADE DAS CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL HERBÁCEO (MASSA SECA).....	90
TABELA – 20	PERCENTUAIS MÉDIOS DO CONTEÚDO DE UMIDADE DAS CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL.....	95
TABELA – 21	<i>SKILL SCORE</i> , PORCENTAGEM DE SUCESSO E AJUSTE APLICADO AOS QUATRO ARRAJOS DE MODELOS DE COMBUSTÍVEIS.....	103
TABELA – 22	REPRESENTATIVIDADE DE ÁREA SIMULADA POR CLASSE DE DIFICULDADE DE SUPRESSÃO, SEGUNDO A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO ( $\text{m.s}^{-1}$ ) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS.....	104
TABELA – 23	MÉDIAS DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO ( $\text{m.s}^{-1}$ ) DE FOGO PARA OS MODELOS.....	105
TABELA – 24	REPRESENTATIVIDADE DE ÁREA SIMULADA POR CLASSE DE DIFICULDADE DE SUPRESSÃO, SEGUNDO O COMPRIMENTO DE CHAMA (m) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS.....	107
TABELA – 25	MÉDIAS DE COMPRIMENTO DE CHAMA (m) PARA OS MODELOS.....	107

TABELA – 26	REPRESENTATIVIDADE DE ÁREA SIMULADA POR CLASSE DE INTENSIDADE DA LINHA DE FOGO (kcal.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS.....	109
TABELA – 27	MÉDIAS DE INTENSIDADE DA LINHA DE FOGO (kcal.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ) PARA OS MODELOS.....	109
TABELA – 28	REPRESENTATIVIDADE DE ÁREA SIMULADA POR CLASSE DE CALOR LIBERADO POR UNIDADE DE ÁREA (kcal.m <sup>-2</sup> ) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS.....	111
TABELA – 29	MÉDIAS DE CALOR LIBERADO (kcal.m <sup>-2</sup> ) PARA OS MODELOS.....	112
TABELA – 30	MEDIDAS ASSOCIADAS AOS VALORES MÉDIOS DE NBR.....	116
TABELA – 31	VALOR MÉDIO DE NBR CORRESPONDENTE AO PERÍODO DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMBUSTÍVEL HERBÁCEO.....	117

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	20
2.1	OBJETIVO GERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	21
3.1	HISTÓRICO E REGIME DO FOGO.....	21
3.2	ECOSSISTEMAS DEPENDENTES DO FOGO.....	23
3.3	MANEJO INTEGRADO DO FOGO (MIF).....	27
3.3.1	Material combustível.....	30
3.3.2	Comportamento do fogo.....	31
3.3.3	Monitoramento de programas de manejo de fogo.....	34
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	36
4.1	ÁREA DE ESTUDO.....	36
4.1.1	Localização da área de estudo.....	36
4.1.2	Características ambientais.....	37
4.2	HISTÓRICO DE FOGO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA.....	42
4.3	REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE CAMPO.....	45
4.3.1	Queimas controladas.....	46
4.3.2	Monitoramento do material combustível fino.....	53
4.4	MODELO DE COMBUSTÍVEL PARA ESTEPE <i>stricto sensu</i> DO PEVV – FARSITE.....	56
4.4.1	Caracterização do incêndio florestal.....	59
4.4.2	Parâmetros de entrada – FARSITE.....	60
4.4.3	Eficiência dos modelos ajustados.....	65
4.5	SEVERIDADE DO INCÊNDIO FLORESTAL E REGENERAÇÃO DE BIOMASSA.....	66
4.5.1	Análise da resposta da vegetação após o incêndio florestal.....	71
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	73

5.1	HISTÓRICO DE OCORRÊNCIA DE FOGO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA.....	73
5.2	QUEIMAS CONTROLADAS.....	81
5.2.1	Condições meteorológicas.....	81
5.2.2	Material combustível.....	84
5.2.3	Comportamento do fogo.....	85
5.2.4	Incremento de biomassa.....	88
5.3	MODELO DE COMBUSTÍVEL PARA ESTEPE <i>stricto sensu</i> DO PEVV – FARSITE.....	96
5.3.1	Condições meteorológicas para o dia 4 de setembro de 2017.....	96
5.3.2	Modelos de combustíveis para representação da paisagem.	98
5.3.3	Ajuste dos modelos combustíveis.....	100
5.3.4	Parâmetros simulados do comportamento do fogo.....	103
5.4	SEVERIDADE DO INCÊNDIO FLORESTAL.....	114
6	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	119
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	120
APÊNDICE 1	VALORES POR AMOSTRA DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO E CONSUMO.....	137
APÊNDICE 2 –	CORRELAÇÃO DE SPEARMAN ENTRE OS PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO DO FOGO, CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL COMBUSTÍVEL E VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS.....	138
APÊNDICE 3 –	ESPACIALIZAÇÃO DA ÁREA REAL E SIMULADA UTILIZADA PARA CÁLCULO DE <i>SKILL SCORE</i> E PORCENTAGEM DE SUCESSO DE MODELOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS.....	141
APÊNDICE 4 –	CÁLCULO DE <i>SKILL SCORE</i> E PORCENTAGEM DE SUCESSO DE MODELOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS.....	142

APÊNDICE 5 –	CÁLCULO DA SUFICIÊNCIA AMOSTRAL (N) PARA AS CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO EM PARCELAS DE QUEIMA CONTROLADA E DE INCÊNDIO.....	143
ANEXO 1 –	EXEMPLIFICAÇÃO DO CÁLCULO PARA O INTERVALO DE RETORNO DE FOGO.....	144



## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Caúla *et al.* (2015), o número de incêndios florestais no Brasil cresceu significativamente nos últimos anos. Segundo os autores, as regiões nordeste, norte e centro oeste do país apresentaram maior densidade de focos de calor por unidade de área no período de 1998 a 2011. Em termos de bioma, Jesus *et al.* (2020) destacaram o Cerrado e a Amazônia, devido a maior densidade de focos na transição Amazônia-Cerrado e divisa com a Caatinga.

A maioria dos biomas brasileiros está propenso a queimas em maior ou menor escala (PIVELLO, 2011), sendo as savanas (Cerrados) juntamente com as Estepes (Campos Sulinos), os que são manejados com maior frequência com o uso do fogo (SEGER *et al.*, 2013).

A região dos Campos Gerais, situada no segundo planalto paranaense, compreende áreas de campo limpo e campos cerrados, que por tempos foram conservados devido à baixa aptidão agrícola da região e isolamento propiciado pela barreira geomorfológica criada pela Escarpa Devoniana (MAACK, 2012; MELO; MORO; GUIMARÃES, 2007). A região destaca-se por sua beleza cênica, importância histórica, cultural, florística, faunística e pelo patrimônio geológico (MELO; MORO; GUIMARÃES, 2007; CARPANEZZI; CAMPOS, 2011; MAACK, 2012), além de potencial laboratório a céu aberto voltado ao ensino e pesquisa (FERNANDES, 2011; SILVA; LUDKA, 2019).

Conforme Rocha e Weirich Neto (2007), a ocupação da região se deu principalmente em virtude das atividades relacionadas ao transporte, comércio e criação de animais entre as regiões sul do país, São Paulo e as regiões mineradoras do século XVIII, sendo nesta época o corredor de ligação entre o principal mercado comprador de animais. Os Campos Gerais passaram a ser ocupados por latifúndios, que se dedicaram principalmente a: a) criação de gado para venda em São Paulo; b) aluguel de invernadas para tropas vindas do Sul; e c) atividades ligadas ao tropeirismo, o qual se manteve como principal eixo da economia regional pelos dois séculos seguintes. Ainda de acordo com os autores, a posse de terras pelos sesmeiros foi simbolizada pela queima periódica dos campos, restritas espacialmente e consideradas ainda pouco significativas. Entretanto, a contínua repartição das propriedades resultou no uso mais

intensivo dos campos e menor periodicidade no uso de fogo, esgotando assim os solos e reduzindo as pastagens e a rentabilidade.

Segundo Dias (2017), o avanço das fronteiras agrícolas na região se deu por meados da década de 1960, com o emprego do plantio direto, a partir do qual houve uma drástica redução dos campos nativos. Outro ponto descrito pelo autor foi o avanço das atividades de base florestal, uma vez que a região é um polo industrial, principalmente de papel e celulose, disseminando espécies exóticas como *Pinus* spp. Moro e Carmo (2007) também apontaram o estabelecimento de espécies exóticas devido ao pastoreio, como *Eragrostis plana* (capim-mole), *Melinis minutiflora* (capim-gordura) e *Brachiaria decumbens* (braquiária), consideradas uma ameaça à vegetação nativa, em razão de competir e eliminar espécies originais da região.

Esses fatores somados à singularidade da região motivaram a criação do primeiro parque estadual do Paraná, o Parque Estadual de Vila Velha, em 1953, e demais Unidades de Conservação (UC), como o Parque Estadual do Guartelá e do Cerrado (1992) e o Parque Nacional dos Campos Gerais (2006) (MELO *et al.*, 2007). Atualmente os Campos Gerais englobam cinco parques estaduais (IAP, 2012), um parque nacional (ICMBIO, 2019), vinte e três Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs) estaduais, cinco RPPNs federais (IAP, 2017) e outras seis categorias de unidades de conservação estaduais (IAP, 2012).

Entretanto, somente a criação de áreas protegidas não garante a conservação desses remanescentes e suas particularidades. Moro e Carmo (2007) descrevem que estudos em distintas esferas têm reforçado o aspecto frágil deste ecossistema. Dentre as principais ameaças e pressões às UCs brasileiras, Fontoura, Medeiros e Adams (2016) destacam a contaminação biológica, pressão por parte do agronegócio, situação fundiária, linhas de transmissão, incêndios florestais, entre outros.

Os incêndios florestais são constantemente apontados como uma das principais ameaças às unidades de conservação, principalmente as que estão inseridas em fisionomias campestres, pois sua vegetação apresenta características consideradas de elevado perigo de incêndio (SEGER *et al.*, 2018), sendo as ações antrópicas a principal fonte de ignição (TORRES *et al.*, 2016). Para tanto, por muitos anos, os gestores de unidades de conservação

inseridas nesta tipologia adotaram a “política de fogo zero” (DURIGAN; RATTER, 2016).

A abordagem da política de exclusão de fogo predominou no Brasil durante o século XX, inclusive no Cerrado, porém essa passou a ser considerada ineficiente para determinadas áreas (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA), 2016). Isto se deu pela compreensão de que ecossistemas campestres, como estepes, campo de cerrado e savanas são ecossistemas dependentes do fogo, ou seja, se beneficiam e respondem positivamente à ação do fogo quando o regime deste é adequado. Ao suprimir o fogo ou torná-lo muito frequente, o regime de fogo pode se tornar prejudicial ao ecossistema, resultando em descaracterização do habitat e redução de biodiversidade (MYERS, 2006).

Assim, um Programa de Manejo Integrado do Fogo (MIF) passou a ser implementado em diversas UCs federais e estaduais em meados de 2014 (FALLEIRO; SANTANA; BERNI, 2016; SCHMIDT *et al.*, 2018). Neste sentido, muitos pesquisadores da área vêm se dedicando a entender como as características do material combustível influenciam a propagação do fogo, a estrutura das chamas, a duração e intensidade dos incêndios, seus possíveis efeitos e o regime de fogo atual em diferentes fisionomias, de modo a restabelecer um regime apropriado e contribuir para a adequada manutenção do meio, auxiliando no planejamento e execução das atividades de prevenção e combate, além de estratégias de restauração da área.

Muitos desses estudos concentram-se em campos de cerrado, principalmente os de longo prazo. Em relação aos campos sulinos, ainda são pontuais os trabalhos que analisam o material combustível, o comportamento de fogo e seus efeitos na vegetação e na fauna.

Por outro lado, queimas controladas vêm sendo realizadas no Parque Estadual de Vila Velha desde 2014 (IAP, 2018), daí a necessidade de pesquisas relacionadas ao regime e efeitos do fogo sobre o ambiente e a compreensão da dinâmica de regeneração, para não só o fogo ser um meio de prevenção e combate, mas também uma ferramenta de conservação para esses remanescentes de ecossistemas dependentes do fogo.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

- Analisar o perfil dos incêndios e o comportamento do fogo em estepe *stricto sensu* no Parque Estadual de Vila Velha.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Traçar o histórico de ocorrência de fogo para o Parque Estadual de Vila Velha, com análise espacial e temporal;
- Realizar queimas controladas, com avaliação dos parâmetros do fogo e quantificação da biomassa;
- Monitorar o incremento dos combustíveis;
- Definir modelo de combustível de estepe *stricto sensu* para uso no FARSITE;
- Analisar a severidade de um incêndio florestal por meio de índice espectral.
- Analisar a resposta da vegetação a um incêndio florestal, mediante o uso de índice espectral.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 HISTÓRICO E REGIME DO FOGO

Os incêndios florestais se constituem num dos principais distúrbios ambientais, desempenhando papel fundamental na estrutura e distribuição da vegetação (BOWMAN *et al.*, 2009), assim como na evolução biológica e nos ciclos biogeoquímicos, tornando o fogo parte integrante do funcionamento de alguns ecossistemas (BOWMAN *et al.*, 2011), de forma a moldar os padrões das paisagens (MEIGS; KRAWCHUK, 2018).

Diversos fatores naturais e antrópicos (*e.g.* cobertura vegetal, material combustível, condições meteorológicas e topografia) influenciam o processo de ignição, propagação e supressão de incêndios (BENICIO *et al.*, 2013; SOARES; BATISTA; TETTO, 2017). Segundo Jiménez-Ruano, Mimbreno e Fernández (2017), ainda é um desafio compreender as interações desses fatores relacionados a atividade de incêndios florestais, para tanto, a análise dos regimes de fogo é um passo primordial.

Regimes de fogo descrevem as características desse elemento, normalmente retratadas por distribuições estatísticas de frequência, tamanho, severidade, sazonalidade, consumo de combustível e padrões de propagação, em uma área específica durante um determinado período de tempo (BOND; KEELEY, 2005; WHITLOCK *et al.*, 2010; LIU; WIMBERLY, 2015). Na visão de Whitlock *et al.* (2010), este conceito deve ainda considerar o papel das pessoas, tanto no passado quanto no presente, devido a influência por elas exercidas.

Bowman *et al.* (2011) descreveram fases globais associadas a ocorrência de fogo, baseadas no conceito clássico do triângulo do fogo (calor, material combustível e oxigênio):

- a) Fogo natural (*natural biospheric fire*): em virtude da evolução da vegetação, o fogo tornou-se um agente seletivo, regido pelas fontes naturais de ignição (atividades vulcânicas e raios), tipos de vegetação e níveis de oxigênio na atmosfera. Segundo Glasspool *et al.* (2015), estudos indicam que durante períodos do Fanerozóico a concentração



de oxigênio diferiu significativamente, sendo observado uma relação direta entre as ocorrências de incêndios e essas oscilações;

- b) Domesticação do fogo (*wildland anthropogenic fire*): os seres humanos pré-históricos dominaram o fogo para diversas finalidades (caça e habitat), utilizando-o em condições meteorológicas adequadas, levando à modificação da vegetação;
- c) Domesticação de plantas e animais (*agricultural anthropogenic fire*): o fogo passou a ser utilizado como uma importante ferramenta, sendo incorporado a muitos sistemas agrícolas, em estações específicas, a fim de preparar campos para cultivo, remover resíduos pós-colheita e estimular o crescimento de pastagens;
- d) Revolução industrial e modernização (*fire suppression and wildfire*): a industrialização influenciou a atividade de fogo na paisagem, modificando os padrões de ignição, permitindo o desenvolvimento de tecnologias de supressão e causando alterações no microclima por meio da emissão de gases para atmosfera; e
- e) Os combustíveis fósseis substituíram cada vez mais a biomassa como fonte de energia após a industrialização.

Atualmente, a distribuição dos incêndios florestais é fortemente influenciada pelos fatores antrópicos (ADÁMEK *et al.*, 2018; HANTSON; PUEYO; CHUVIECO, 2015). Os seres humanos interferem nos regimes de fogo de diversas maneiras, tais como modificar o tipo, estrutura e arranjo dos combustíveis e excluir, elevar ou reduzir a ignição de incêndios em diferentes épocas do ano, sob distintas condições meteorológicas, sendo que as motivações variam desde incêndios criminosos, gestão de recursos naturais e proteção de infraestrutura e de áreas urbanas (BOWMAN *et al.*, 2011).

Cabe ressaltar que potencialmente todo ecossistema possui um regime de fogo e, quando ecologicamente apropriado, esse regime mantém a viabilidade, composição e funcionamento adequado do ecossistema (MYERS, 2006). A partir dos distintos papéis que o fogo exerce nos ecossistemas, Hardesty, Myers e Fulks (2005) e Myers (2006) os categorizaram em quatro ecorregiões: a) ecossistemas dependentes do fogo; b) independentes do fogo; c) sensíveis ao fogo; e d) influenciados pelo fogo.

Myers (2006) descreve os ecossistemas dependentes do fogo como sendo aqueles em que as espécies evoluíram na presença do fogo, de forma a apresentarem adaptações e responderem positivamente a ele. Os ecossistemas independentes são aqueles em que o fogo normalmente exerce um pequeno papel ou é desnecessário. Em ecossistemas sensíveis as espécies não evoluíram na presença do fogo, assim não apresentam adaptações, sendo o índice de mortalidade elevado mesmo quando a intensidade do fogo é muito baixa. Enquanto os ecossistemas influenciados pelo fogo incluem os tipos de vegetação que se encontram na zona de transição entre ecossistemas dependentes e os sensíveis ou independentes do fogo.

Conforme Shlisky *et al.* (2007), as ecorregiões com regime de fogo degradado ou muito degradado cobrem aproximadamente 61% da área terrestre global, enquanto 25% apresentam condições de regime de fogo aceitáveis.

### 3.2 ECOSSISTEMAS DEPENDENTES DO FOGO

Das principais ecorregiões globais, as dependentes e influenciadas pelo fogo são predominantes, com cerca de 46% (HARDESTY; MYERS; FULKS, 2005) a 53% (SHLISKY *et al.*, 2007) da área terrestre global, contendo o cerrado brasileiro, as savanas africanas, as áreas de eucalipto australianas e as florestas de taigas, por exemplo. No Brasil, os ambientes dependentes e influenciados pelo fogo envolvem o Pantanal, Pampa e Cerrado. Este último possui seu limite sul nos Campos Gerais paranaense, que apresenta afinidade com as formações do Cerrado na forma de fragmentos disjuntos (CERVI *et al.*, 2007; RITTER; RIBEIRO; MORO, 2010), logo também considerado um ecossistema dependente do fogo. Denominados como estepe gramíneo-lenhosa pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012), suas extensas áreas de campo são entremeadas por agrupamentos arbóreos marginais aos rios ou isolados (capões) de Floresta Ombrófila Mista (FOM), onde *Araucaria angustifolia* se sobressai (RODERJAN *et al.*, 2002), tipologia esta que por sua vez é categorizada como influenciada pelo fogo.

Para a região sul do Brasil, há apenas alguns registros de carvão provenientes de incêndios florestais disponíveis (BEHLING; PILLAR, 2007), os quais apontam a raridade de ocorrência durante períodos glaciais (entre 42.840

a 11.500 anos Antes do Presente - AP) (BEHLING, 1997; BEHLING; PILLAR, 2007). Quanto a região do Cerrado brasileiro, constatou-se a presença de partículas de carvão vegetal há mais de 36.000 AP, indicando a presença de queimadas, sendo que até 20.000 AP o clima na região de cerrado era úmido e mais frio que o presente (SALGADO-LABOURIAU, 2005). De acordo com a autora, entre 22.000 a 18.000 AP a umidade começou a diminuir, resultando em uma fase seca que perdurou até 7.000 AP em certas regiões do Brasil e que atingiu o seu máximo no período de 14.000 a 10.500 AP. Dentre esse período, de 12.000 a 9.000 AP, Power *et al.* (2008) identificaram uma mudança significativa nos regimes de fogo em todo o globo, com ressalva para o acréscimo na quantidade de incêndios em regiões do Brasil, quando comparado ao período pré-industrial (de 1000 a 100 AP), cenário esse também observado há 6.000 e 3.000 AP. Salgado-Labouriau (2005) relata que a região do Cerrado brasileiro foi ocupada por indígenas há aproximadamente 10.000 AP e os assentamentos aumentaram após 5.000 AP, período em que o clima passa a ser semiúmido com uma estação seca prolongada. Para as regiões campestres ao sul do país, Behling e Pillar (2007) indicam que o fogo se tornou mais frequente cerca de 7.400 AP, fato provavelmente relacionado ao início da ocupação dos Ameríndios. Esses dois fatores, mudança das condições climáticas e acréscimo das populações humanas, podem ter contribuído localmente para alterações na incidência de incêndios (POWER *et al.*, 2008).

Os ambientes dependentes diferem-se entre si nas formas de crescimento e em suas características adaptativas, uma vez que esses estão relacionados ao regime de fogo particular de cada ambiente (BOND; KEANE, 2017), assim pode-se considerar o fogo como um agente mutagênico (HE; LAMONT; PAUSAS, 2019). A exemplo disso, Pellegrini *et al.* (2017) evidenciaram forte ligação entre o fogo e a variabilidade de espessura de casca de espécies arbóreas por distintos biomas em todo o mundo, confirmando assim, que o investimento em casca é uma adaptação generalizada em áreas frequentemente queimadas, tanto em regiões temperadas quanto em regiões tropicais.

Dentre outras adaptações, Coutinho (1990) descreve a suberização do tronco e galhos das árvores, permitindo o isolamento térmico, presença de estruturas que protegem as gemas apicais, a capacidade de rebrota, a

deiscência de frutos e o favorecimento da germinação, enquanto muitas espécies da flora herbácea exibem órgãos subterrâneos, como bulbos, rizomas e xilópodes que, devido ao isolamento fornecido pelo solo, também escapam à ação destrutiva do fogo.

O que caracteriza esses ecossistemas, no entanto, é a resiliência e a recuperação de suas plantas e animais após a exposição ao fogo, considerando seu regime de fogo (HARDESTY; MYERS; FULKS, 2005). Desse modo, caso o fogo seja suprimido, ou seu regime alterado além da variação natural, poderá haver modificações no ecossistema, impactando negativamente a diversidade de espécies e de habitats (MYERS, 2006).

Os incêndios naturais no Cerrado são causados por raios e normalmente ocorrem na estação chuvosa ou nos meses de transição sazonal, com um tempo de retorno de três a oito anos (FIDELIS *et al.*, 2018). Porém, no período entre 1600 até a década de 1960, o regime de fogo nesse bioma foi alterado devido às atividades antrópicas, principalmente pela queima por parte de pecuaristas, que utilizam as fisionomias abertas como pastagens nativas, de forma anual ou bianual durante ou no final da estação seca, o que resulta em uma queima mais intensa, devido ao acúmulo de biomassa morta (MEDEIROS; FIEDLER, 2004; FIDELIS *et al.*, 2018).

Esse comportamento também foi observado por Maack (2012) para as áreas campestres da região sul do Brasil. Segundo Behling e Pillar (2007), o gado foi introduzido nessa região na primeira década do século XVIII e, assim como no Cerrado, Maack (2012) relata que os fazendeiros introduziam o fogo no período seco (de julho a início de setembro), anualmente, resultando em uma contínua seleção entre as gramíneas e outras plantas, reduzindo gradativamente as espécies higrófitas para dar lugar às gramíneas xerófitas. Porém, o autor ainda relata a redução da quantidade de pasto nativo para o gado ao longo dos anos, o que levou a transformar o pasto natural em “pasto artificial”, com gramíneas selecionadas, modificando o hábito de queimar o campo.

Bowman *et al.* (2011) citam alterações no regime de fogo em diversos biomas entre a era pré e pós-industrial. Segundo os autores, em savanas tropicais, o regime de fogo passou de incêndios frequentes na estação seca, o que resultava em heterogeneidade espacial na densidade das árvores no período pré-industrial (domesticação do fogo e da agricultura), para redução de

incêndios, causando aumento no recrutamento de espécies lenhosas, no período pós-industrial.

De acordo com Myers (2006), durante o século XX o fogo passou a ser considerado como uma ameaça à população e aos recursos naturais, levando diversos países a desenvolverem programas aprimorados de prevenção e supressão dos incêndios, modificando a percepção da sociedade com relação ao uso do fogo como ferramenta para a modelagem da paisagem, o que resultou em um acúmulo de material combustível e em uma alteração da vegetação, de modo a ficar mais propensa aos incêndios. Shlisky *et al.* (2007) apontam ainda que a supressão de fogo nos ecossistemas dependentes do mesmo também pode levar a uma maior degradação pelo aumento da densidade de arbustos e florestas, perda de espécies adaptadas ao fogo, acréscimo de espécies sensíveis ao fogo e comportamento do fogo não característico, quando esse escapa das forças de supressão.

Segundo Falleiro, Santana e Berni (2016), acompanhando essa tendência mundial, nas últimas décadas do século XX e início do século XXI, diversos programas destinados a “educar” e orientar indígenas sobre os efeitos negativos do fogo foram implementados no Brasil, modificando a cultura e levando ao abandono de práticas tradicionais de subsistência, de forma a eliminar o manejo de savanas com o fogo, que era realizado por populações indígenas há milênios.

Na maioria das vezes, quando as Unidades de Conservação (UCs) no Brasil são estabelecidas, todo tipo de distúrbio é delas retirado (FIDELIS; PIVELLO, 2011). A “política do fogo zero” é comum em áreas protegidas do Cerrado, onde o fogo foi extinto ou evitado, principalmente pelo estabelecimento de aceiros (FIDELIS *et al.*, 2018). Oliveira e Maranhão (2011) relataram que, pelo menos até o ano de 2011, o fogo foi considerado um inimigo da estepe *stricto sensu* e prevalecia a política de total supressão e ausência do fogo no Parque Estadual de Vila Velha, na região dos Campos Gerais.

Os incêndios que ocorrem em UCs brasileiras normalmente iniciam-se em áreas limítrofes, devido ao uso incorreto do fogo para renovação de pastagem ou eliminação de resíduos (TORRES *et al.*, 2016). Deste modo, a prática de exclusão do fogo raramente é efetiva por longos períodos, uma vez que incêndios são recorrentes (SCHMIDT *et al.*, 2016a), e principalmente

quando ocorrem em anos atipicamente secos ou no final da estação seca, tendem a ser mais extensos, intensos e com maior quantidade de calor liberado (MYERS, 2006; SCHMIDT *et al.*, 2016a; SEGER *et al.*, 2018), podendo atingir vegetações que são sensíveis ao fogo, como formações ripárias, provocar maiores taxas de mortalidade e reduzir a capacidade reprodutiva de diversas espécies em ecossistemas dependentes (SCHMIDT *et al.*, 2016a).

Scott *et al.* (2012) observaram mudanças na estrutura e composição em savanas ao norte da Austrália após um período de 20 anos sem a presença de fogo, levando determinadas áreas a ultrapassar um limiar ecológico, de floresta aberta a floresta fechada. Segundo os autores, diversos estudos nas savanas do norte da Austrália documentaram a transição para florestas fechadas na ausência de fogo a longo prazo.

A escassez de informação sobre o papel do fogo e a complexidade de entender o funcionamento destes ecossistemas, somado aos esforços de controle ou de prevenção a todos os incêndios, potencialmente pode conduzir a resultados insatisfatórios, sendo essencial uma primeira compreensão do papel ecológico do fogo para tomadas de decisões (MYERS, 2006).

O uso do fogo possui uma abundância de efeitos e formas, desde o seu uso tradicional, até o uso do fogo controlado, prescrito ou por manejo de incêndios (MYERS, 2006), seja para restaurar e manter ecossistemas em áreas de conservação, eliminar ou reduzir combustíveis ou proteger ecossistemas sensíveis ao fogo (SCHMIDT *et al.*, 2018). Em distintos ecossistemas dependentes do fogo, ações diretas de Manejo Integrado do Fogo (MIF) são executadas há décadas como parte do manejo de áreas protegidas em alguns países, como Estados Unidos, África do Sul e Austrália (SCHMIDT *et al.*, 2016b).

### 3.3 MANEJO INTEGRADO DO FOGO (MIF)

O Manejo Integrado do Fogo (MIF) integra os componentes técnicos: prevenção, supressão e uso do fogo em um regime de fogo ecologicamente adequado. Ainda aborda as necessidades socioeconômicas e culturais do uso do fogo junto com os impactos negativos que a queimada pode ter para a sociedade, de modo a auxiliar nas decisões e garantir uma abordagem das

principais causas do fogo, da tendência ecológica e da necessidade de queimar certos ecossistemas (MYERS, 2006).

Após a prática por décadas da “política do fogo zero” por diversos países da América Latina (ELOY *et al.*, 2019), o Brasil, assim como a Venezuela (MISTRY *et al.*, 2019; BILBAO *et al.*, 2019) e a Guiana (BILBAO *et al.*, 2019) recentemente têm discutido e implementado políticas de gerenciamento de fogo, passando por uma mudança de paradigma em suas abordagens (SCHMIDT *et al.*, 2018; MISTRY *et al.*, 2019).

Conforme Falleiro, Santana e Berni (2016), algumas mudanças recentes no cenário nacional foram fundamentais para o fortalecimento do emprego do manejo do fogo, inclusive para o uso tradicional em terras indígenas brasileiras, dentre elas o reconhecimento legal da prática pela Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (BRASIL, 2012), a criação de um programa específico para o controle dos incêndios florestais nas terras indígenas (Programa Brigadas Federais do Ibama/Prevfogo) e a capacitação de técnicos em MIF, proporcionado pelo projeto Cerrado-Jalapão, uma parceria entre os governos do Brasil e da Alemanha.

Perante o Código Florestal brasileiro é permitido o uso de fogo em unidades de conservação voltado para a manutenção de determinados ecossistemas, assim como para agricultura de subsistência exercidas pelas populações tradicionais e indígenas:

Art. 38. É proibido o uso de fogo na vegetação, exceto nas seguintes situações:

I - em locais ou regiões cujas peculiaridades justifiquem o emprego do fogo em práticas agropastoris ou florestais, mediante prévia aprovação do órgão estadual ambiental competente do Sisnama, para cada imóvel rural ou de forma regionalizada, que estabelecerá os critérios de monitoramento e controle;

II - emprego da queima controlada em unidades de conservação, em conformidade com o respectivo plano de manejo e mediante prévia aprovação do órgão gestor da unidade de conservação, visando ao manejo conservacionista da vegetação nativa, cujas características ecológicas estejam associadas evolutivamente à ocorrência do fogo;

III - atividades de pesquisa científica vinculada a projeto de pesquisa devidamente aprovado pelos órgãos competentes e realizada por instituição de pesquisa reconhecida, mediante prévia aprovação do órgão ambiental competente do Sisnama.

§ 2º Excetuam-se da proibição constante no *caput* as práticas de prevenção e combate aos incêndios e as de agricultura de subsistência exercidas pelas populações tradicionais e indígenas (BRASIL, 2012).



O primeiro programa piloto de MIF em unidades de conservação brasileiras foi introduzido em 2014, em três áreas, sendo: Parque Nacional (PARNA) da Chapada das Mesas, Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins e Parque Estadual do Jalapão (FALLEIRO; SANTANA; BERNI, 2016; SCHMIDT *et al.*, 2018). Segundo Schmidt *et al.* (2018), esse programa é embasado no gerenciamento de incêndios na savana australiana e em técnicas de queima em mosaico, visando principalmente melhorar a capacidade da UC em conservar a biodiversidade, aprimorar a comunicação com as comunidades do entorno e reduzir os custos de combate aos incêndios.

Segundo Silva *et al.* (2019), o número de UCs Federais que formalizaram o planejamento de suas atividades por meio de Planos de Manejo do Fogo (PMIF) em 2017 foi de 53, elevando-se para aproximadamente 200 em 2019. Destas, 44% possuem brigada contratada e, de acordo com os autores, a contratação de mão-de-obra especializada para execução de ações de manejo de fogo foi favorecida pela Lei nº 13.668, de 28 de maio de 2018, que altera art. 12 da Lei nº 7.957, de 20 de dezembro de 1989, que amplia o prazo de contratação de seis meses para até três anos, fato que auxilia na consolidação do MIF nas UCs brasileiras.

Para Pivello (2011) e Durigan e Ratter (2016) faz-se necessária a implementação com caráter emergencial de programas adequados, assim como de uma política nacional de incêndios, que visem a manutenção da diversidade biológica e de processos ecológicos. Nesse sentido, o Projeto de Lei nº 11.276 de 2018 (BRASIL, 2018), em trâmite, propõe a política nacional de manejo integrado do fogo e tem por finalidade disciplinar e promover articulação interinstitucional alusiva ao manejo integrado do fogo, a redução da incidência e dos danos dos incêndios florestais e a restauração do papel ecológico e cultural do fogo, e dá outras providências.

Além de políticas públicas, Mistry *et al.* (2019) reforçam a necessidade de um ambiente de aprendizado adaptativo coletivo, que possibilite a execução de experimentos e monitoramento de distintos métodos e intervenções de manejo de fogo, de forma a integrar conhecimento científico e local (indígena e tradicional).



### 3.3.1 Material combustível

Material combustível é citado por White, Ribeiro e Souza (2014) como todo e qualquer tipo de matéria orgânica, viva ou morta, presente no ambiente, capaz de entrar em combustão e queimar. Segundo Beutling *et al.* (2012), esses apresentam uma localização no estrato florestal (aéreo, superficial ou subterrâneo) e são caracterizados pelo tipo (perigosos, semi-perigosos e verdes), pelo arranjo (distribuição, continuidade e compactação) e pela quantidade (total e disponível). White, Ribeiro e Souza (2014) ressaltam que esta subdivisão da carga do combustível se dá pelo fato de que nem todo o material presente na área está disponível para ser consumido.

O combustível florestal é o único elemento do triângulo do fogo sujeito a ações antrópicas, logo, passível de controle. Assim, a sua quantificação está relacionada às ações de combate e queima controlada, pois são eles os responsáveis por características do comportamento do fogo como intensidade e velocidade de propagação (BEUTLING *et al.*, 2012), sendo normalmente expressa em termos de massa de matéria seca ao forno por unidade de área (SEGER *et al.*, 2018).

Seeger (2016) aponta que as características dos combustíveis florestais e sua relevância na ignição e propagação dos incêndios foram objeto de estudo de diversos autores, para distintos tipos de vegetação. Por muitas vezes áreas campestres da região sul do país e do Cerrado são comparadas entre si, assim como com savanas africanas e/ou australianas, devido à similaridade do tipo vegetação entre essas tipologias. Entretanto, deve-se ressaltar as características ambientais de cada lugar.

Especificamente para a estepe *stricto sensu* paranaense, foram encontrados na literatura estudos, com ênfase em material combustível, realizados por Seeger (2015 e 2016), Rodrigues (2018) e Santos (2020), que estão resumidamente apresentadas a seguir, na Tabela 1.

TABELA 1 – CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMBUSTÍVEL HERBÁCEO PARA ESTEPE *stricto sensu* PARANAENSE

Fonte	Local	Estação do ano	Classes de material combustível herbáceo							
			Vivo		Morto		Miscelânea		Total	
			Massa (Mg.ha <sup>-1</sup> )	TU (%)	Massa (Mg.ha <sup>-1</sup> )	TU (%)	Massa (Mg.ha <sup>-1</sup> )	TU (%)	Massa (Mg.ha <sup>-1</sup> )	TU (%)
Rodrigues (2018)	PEVV	Primavera	1,4	97,6	6,9	27,5	4,3	27,7	12,6	50,9
		Verão	2,3	109,6	7,0	45,7	3,7	45,8	13,0	67,0
		Outono	1,4	99,2	6,7	27,6	4,3	23,2	12,4	50,0
Seger (2016)		Inverno	1,2	100,2	6,8	27,0	4,3	25,8	12,3	51,0
Santos (2020)		Inverno	1,7	123,0	7,9	34,8	1,4	51,6	11,1	69,8
Seger (2015)	RPPN Caminho das Tropas	Primavera	3,4	130,0	4,6	52,6	2,8	52,8	10,8	78,5
		Verão	3,9	138,2	4,5	80,6	2,1	79,3	10,6	99,3
		Outono	3,7	135,7	5,1	42,6	3,9	46,0	12,7	74,8
		Inverno	1,4	127,8	4,5	49,3	3,5	56,3	9,6	77,8

FONTE: Adaptado pela autora (2020).

NOTA: TU = Teor de Umidade

Conforme os autores anteriormente citados, os valores de carga de material combustível por eles descritos são compatíveis com informações contidas em literatura para vegetação de campo de distintos países.

Seger (2015) e Rodrigues (2018) indicaram uma oscilação ao longo do ano para a carga e teor de umidade do material combustível. Segundo Pereira, Batista e Soares (2012), o teor de umidade do material combustível fino morto está associado ao nível de perigo de incêndio. White (2018) descreve que, quanto maior a umidade do material combustível, maior a dificuldade deste material queimar e originar um incêndio, devido o maior emprego de energia necessária para, inicialmente, evaporar a água e, a partir de então, originar o processo de combustão. Neste contexto, o autor menciona que o teor de umidade do material combustível morto e fino, é sobretudo reconhecido como um parâmetro-chave que intervém basicamente todos os processos envolvidos nos incêndios florestais: perigo, ignição e comportamento.

### 3.3.2 Comportamento do fogo

O termo “comportamento do fogo” refere-se ao resultado da interação entre condições meteorológicas, relevo, técnica de queima, forma de ignição e condições do material combustível, sendo basicamente descrito pelos parâmetros de velocidade de propagação, energia liberada, tempo de residência e intensidade do fogo (SOARES; BATISTA; TETTO, 2017). Esta última variável é considerada uma das mais importantes, pois descreve a magnitude da

combustão em termos de energia liberada. Desse modo, também é o fator mais utilizado para comparar queimas e incêndios florestais, bem como para avaliar os efeitos do fogo no ambiente (BATISTA; BEUTLING; PEREIRA, 2013).

O conhecimento do comportamento do fogo é fundamental para se compreender os elementos do processo e seus efeitos (CAMARGOS *et al.*, 2015). Sua relação com o regime de fogo e material combustível são requisitos essenciais para a tomada efetiva de decisões sobre o manejo do fogo e sobre os programas educacionais (MYERS, 2006).

Deste modo, com a finalidade de se estabelecer modelos de previsão das características de queimadas e incêndios florestais, assim como de seus potenciais efeitos sobre o ecossistema, diversos estudos têm sido realizados desde meados do século passado em muitos países (BATISTA; BEUTLING; PEREIRA, 2013).

Especificamente no Brasil, as primeiras pesquisas, realizadas na década de 1980, foram desenvolvidas em áreas de cultivos florestais (BATISTA; BEUTLING; PEREIRA, 2013). Atualmente os estudos ainda são incipientes, sobretudo em vegetação nativa, os quais se concentram no bioma Cerrado, demonstrando ainda serem necessárias pesquisas para conhecer as inter-relações que afetam o comportamento do fogo e seus efeitos nos diferentes biomas (CAMARGOS *et al.*, 2015). De acordo com o levantamento realizado por Gomes, Miranda e Bustamante (2018), 16 estudos foram desenvolvidos no Cerrado de 1992 a 2017, relacionados à queimas controladas, fatores de influência, comportamento do fogo e/ou os efeitos resultantes. Entretanto, as autoras observaram uma escassez de estudos para esse último item, especialmente em escalas de tempo mais longas.

Para a tipologia de estepe *stricto sensu*, Seger *et al.* (2013) apontam uma insuficiência no desenvolvimento de pesquisas a respeito do comportamento do fogo, bem como a resposta da vegetação. Dentre os principais estudos nesta temática para a tipologia, destacam-se os elaborados por Seger (2015) e Maranhão (2014). Outras pesquisas vêm sendo desenvolvidas no âmbito de incêndios florestais, zoneamentos de risco de incêndios florestais (e.g. KOVALSYKI, 2016; ANDRADE, 2017), índices de perigo de incêndios (e.g. SANTOS, 2020) e caracterização de combustíveis (e.g. SEGER, 2016; RODRIGUES, 2018).

Segundo Batista, Beutling e Pereira (2013), os experimentos em ambiente aberto sobre comportamento do fogo são árduos devido à dificuldade em controlar e/ou monitorar os diversos fatores envolvidos, entretanto são fundamentais para a compreensão da relação entre o ambiente florestal e a combustão, possibilitando o estabelecimento das bases para a previsão do comportamento do fogo nas áreas florestais do Brasil.

As pesquisas desenvolvidas nesta esfera apresentam uma padronização de análise de dados, que consideram principalmente os parâmetros de velocidade de propagação, comprimento de chama e intensidade da linha de fogo (BATISTA; BEUTLING PEREIRA, 2013). Adicionalmente, autores ainda abordam as variáveis de calor liberado por unidade de área (e.g. SEGER *et al.*, 2013; CAMARGOS *et al.*, 2015), altura de crestamento (e.g. RIBEIRO, 1997), altura de carbonização (e.g. RIBEIRO, 1997) e temperatura na zona de combustão (e.g. GANASSOLI NETO, 2019).

Conforme Vélez (2009), é possível modelar o comportamento de um incêndio a partir do conhecimento de fatores naturais: combustibilidade da vegetação, umidade relativa, vento e topografia. White *et al.* (2016) citam que aproximadamente 43 modelos matemáticos foram desenvolvidos para descrever o comportamento do fogo de superfície de 1940 a 2000 pelo mundo, sendo o modelo de Rothermel (1972) o mais utilizado para estimar a taxa de propagação do fogo e o modelo de Byram (1959) para estimar a intensidade da linha de fogo. Esses modelos matemáticos podem ser integrados a um sistema de simulação de comportamento de fogo (PAIXÃO, 2014), que por sua vez são categorizados como estáticos ou dinâmicos.

Nos simuladores estáticos, os valores das variáveis requeridas são introduzidos diretamente no programa, que gera como resultado os principais parâmetros do comportamento do fogo, como é o caso do BEHAVE.

O sistema BEHAVE, desenvolvido pelos Estados Unidos da América em 1984, implementa o modelo semi-empírico desenvolvido por Rothermel e Burgan, em 1984 (VÉLEZ, 2009). Atualmente denominado de BehavePlus, esse sistema fornece um meio de modelar o comportamento do fogo (como taxa de propagação e distância de detecção), efeitos do fogo (como altura da queima e mortalidade das árvores) e o ambiente do fogo (como a umidade do combustível e o fator de ajuste do vento) (ANDREWS, 2014).

Os simuladores dinâmicos requerem uma base cartográfica com a informação das variáveis de partida de cada *pixel*, permitindo determinar o avanço do perímetro do fogo para uma direção estabelecida, junto com os principais parâmetros do comportamento, como o FARSITE, que recentemente foi incorporado ao sistema FlamMap versão 6.0 (FIRELAB, 2019).

O FARSITE (FINNEY, 2004) incorpora modelos existentes para propagação do fogo na superfície (ROTHERMEL, 1972), início de incêndio de copa (VAN VAGNER, 1977), propagação de incêndio de copa (ROTHERMEL, 1991), distância máxima de manchas (*spotting*) (ALBINI, 1979) e modelo de umidade de combustível morto (NELSON, 2000). Estes modelos permitem calcular o crescimento e o comportamento dos incêndios florestais por longos períodos de tempo sob condições heterogêneas de terreno, combustíveis e variáveis meteorológicas, por meio de informações espaciais sobre topografia e combustíveis, além de arquivos de condições meteorológicas.

Conforme Molina (2009), o FARSITE pode ser utilizado para testar distintos cenários de propagação e comportamento usando previsões atmosféricas a curto prazo; simular e comparar os efeitos de diferentes estratégias de combate, uma vez que o programa permite empregar barreiras de propagação de fogo, ataque direto, indireto e paralelo; e auxilia no dimensionamento e otimização das estruturas preventivas, nos tratamentos de modificação de combustível e no planejamento de queimas prescritas, entre outros.

### 3.3.3 Monitoramento de programas de manejo de fogo

Conforme Schmidt *et al.* (2016b), os indicadores utilizados para monitoramento de programas de manejo de fogo variam conforme a região, sendo os comumente observados: áreas atingidas, épocas e locais de ocorrência (manejaadas ou não) e estrutura da vegetação.

Segundo Bontempo *et al.* (2011), o início do registro das ocorrências de incêndios em unidades de conservação data do ano de 1979. Após a criação do Sistema Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais (Prevfogo), em 1989, houve um avanço no registro e compilação de dados, sendo adotada em 2001 a prática sistemática do preenchimento do Registro de Ocorrência de

Incêndios (ROI), considerado fundamental para o planejamento e acompanhamento de atividades relacionadas ao manejo integrado do fogo. Apesar de sua importância, Torres *et al.* (2016) afirmam que muitos dados dos ROIs em unidades de conservação são preenchidos de maneira incompleta ou sem um critério mais apurado pelos responsáveis. Tendo isso em vista, Schmidt *et al.* (2016b) destacam o uso de ferramentas de geoprocessamento para a caracterização de regimes de fogo em regiões nas quais programas de manejo de fogo foram implementados.

As imagens derivadas da série de satélites Landsat são consideradas uma importante fonte de informação e possibilitam a extração de séries temporais (PEREIRA *et al.*, 2016; ALVES *et al.*, 2018). Disponível desde 1984, com uma resolução espacial de 30 metros e uma resolução temporal de 16 dias, oferece o melhor benefício entre cobertura temporal e resolução espacial, tornando-o ideal para mapear cicatrizes de incêndio em paisagens de savanas de escalas locais e regionais (ALVARADO *et al.*, 2017; ALVES *et al.*, 2018).

Estudos retrospectivos, amparados em sensoriamento remoto histórico, proporcionaram a reconstrução de histórico de fogo em diversos ecossistemas pelo mundo (WITTKUHN; HAMILTON, 2010; ALVARADO *et al.*, 2017), sendo realizado desde a década de 1980 na Amazônia brasileira e no Cerrado (PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2014). Com auxílio do geoprocessamento pode-se ainda analisar as mudanças ocorridas ao longo do tempo (SILVA *et al.*, 2018), monitorar a vegetação (ALVES *et al.*, 2018) e mapear a frequência e o tempo desde a última queima (PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2014; ALVARADO *et al.*, 2017; BATISTA *et al.*, 2018).

Segundo Myers (2006), intercorrências dentro dos componentes do regime de fogo podem ser mais importantes do que a média das propriedades destes componentes. Para se obter conclusões bem fundamentadas, é primordial a compreensão da história de vida e respostas do fogo: (1) das principais espécies, tais como das que controlam o fogo por meio da produção de combustível; (2) das espécies dominantes, que conferem ao ecossistema a sua característica geral; e (3) das espécies que merecem cuidados especiais, para então serem planejadas as ações de manejo integrado do fogo, das quais o efeito deve ser monitorado e adaptado ao longo do tempo, em mecanismo de retroalimentação.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

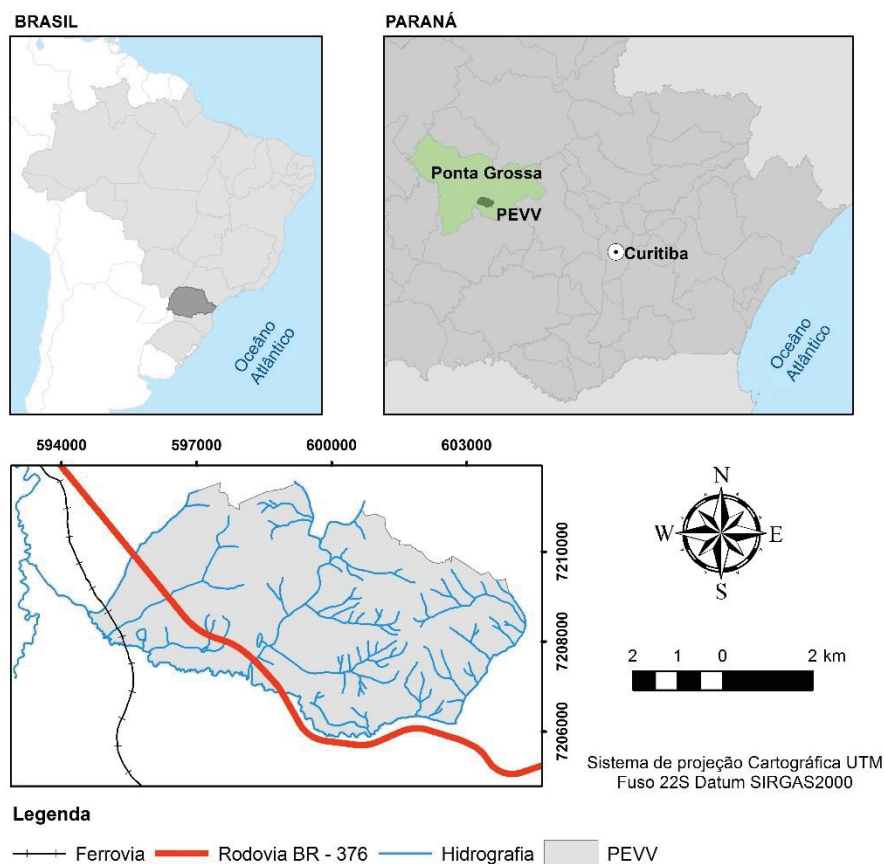
### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi desenvolvida no Parque Estadual de Vila Velha (PEVV), mediante autorização nº 53.16, de 8 de novembro de 2016.

#### 4.1.1 Localização da área de estudo

O parque está localizado no segundo planalto paranaense, na região denominada Campos Gerais, no município de Ponta Grossa no estado do Paraná, entre as coordenadas 25° 12' 34" a 25° 15' 35" S e 49° 58' 04" a 50° 03' 37" W (FIGURA 1), a 20 km da sede municipal e a 90 km, aproximadamente, da capital paranaense pela rodovia BR-376, principal acesso que liga o litoral às regiões noroeste, sudeste e norte do estado.

FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA



FONTE: IBGE (2015); IAP (2004), elaborado pela autora (2020).



Devido às formações areníticas de expressivo valor cênico, científico, histórico e ambiental, o Parque Estadual de Vila Velha foi criado por meio da Lei nº 1.292, de 12 de outubro de 1953, com uma área de 3.122,11 ha (PARANÁ, 1953), sob responsabilidade do Instituto de Água e Terra (IAT), antigo Instituto Ambiental do Paraná (IAP), tendo sua área alterada para 3.803,28 ha, conforme o Decreto nº 5.767, de 5 de junho de 2002 (PARANÁ, 2002). Entretanto, o *shapefile* referente ao limite do PEVV apresenta uma área total de 3269,41 ha e um perímetro de 31,01 km (IAP, 2004), valores adotados no presente estudo.

De acordo com o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), o parque se enquadra na categoria de unidades de proteção integral, que tem por objetivo preservar a natureza, admitindo somente o uso indireto dos seus recursos naturais (BRASIL, 2000), com seus objetivos e diretrizes da UC descritos em seu plano de manejo implementado em 2004.

#### 4.1.2 Características ambientais

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Cfb, ou seja, temperado úmido, sem estação seca, com verão fresco e geadas periódicas. Conforme a classificação de Holdrige, a região está localizada na zona de vida floresta úmida subtropical montana baixa (TRES *et al.*, 2020). A Tabela 2 apresenta o registro meteorológico histórico (de 1954 a 2001) do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR, 2019).

TABELA 2 – VALORES HISTÓRICOS DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS PARA PONTA GROSSA - PR

Mês	Temperatura do ar (°C)			UR média (%)	Vento		Precipitação	
	Média máxima	Média mínima	Média		Sentido	Velocidade (m.s <sup>-1</sup> )	Total (mm)	Dias de chuva
Janeiro	27,6	17,2	21,4	78	NE	3,3	186,5	15
Fevereiro	27,4	17,4	21,4	79	NE	3,0	161,0	14
Março	26,4	16,2	20,3	80	NE	2,9	137,8	13
Abril	24,2	13,8	18,0	79	NE	3,2	101,3	8
Maio	21,5	10,5	15,1	80	NE	3,1	116,3	8
Junho	20,0	9,2	13,9	79	NE	3,2	117,7	8
Julho	20,2	9,1	13,8	77	NE	3,6	95,8	7
Agosto	21,8	10,2	15,2	75	NE	3,7	78,9	7
Setembro	22,6	11,8	16,4	75	NE	4,0	135,5	10
Outubro	24,3	13,5	18,0	76	NE	3,9	152,7	11
Novembro	26,1	14,8	19,5	73	NE	3,9	119,2	10
Dezembro	27,0	16,3	20,8	75	NE	3,6	151,0	13
Média	24,1	13,3	17,8	77		3,5	-	-
Total	-	-	-	-		-	1.553,7	124

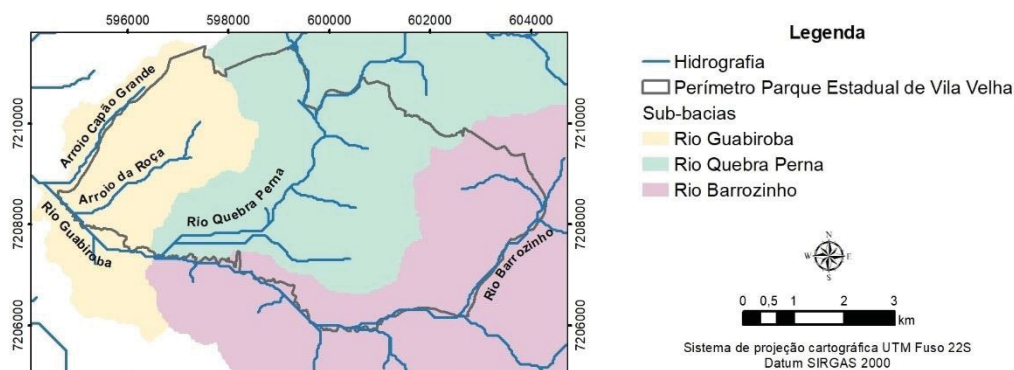
FONTE: IAPAR (2019).



A precipitação anual média observada para o município foi de 1.553,7 mm, distribuídos em 124 dias. Os meses mais chuvosos foram janeiro, fevereiro e outubro, enquanto o menos chuvoso foram julho, agosto e abril. A temperatura média anual foi de 17,8 °C, com temperatura média máxima registrada no mês de janeiro (27,6 °C) e mínima em julho (9,1 °C). A umidade relativa média do ar foi de 77%, com menor valor em novembro. O sentido predominante do vento foi nordeste, com velocidade média mensal variando de 2,9 a 4,0 m.s<sup>-1</sup>. A ocorrência de geadas concentra-se no período de maio a agosto, com até quatro ocorrências nos meses de junho e julho (IAP, 2004).

O Parque Estadual de Vila Velha localiza-se no trecho superior da bacia do rio Tibagi, havendo nascentes de rios tributários deste na área do parque (CAMPOS; DALCOMUNE, 2011). A rede de drenagem do parque é composta pelos rios Barrozinho e Quebra Perna, que formam na sua confluência o Rio Guabiroba. Destacam-se também os Arroios Capão Grande e da Roça, Lagoa Dourada e Tarumã (IAP, 2004) (FIGURA 2).

FIGURA 2 – HIDROLOGIA DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA

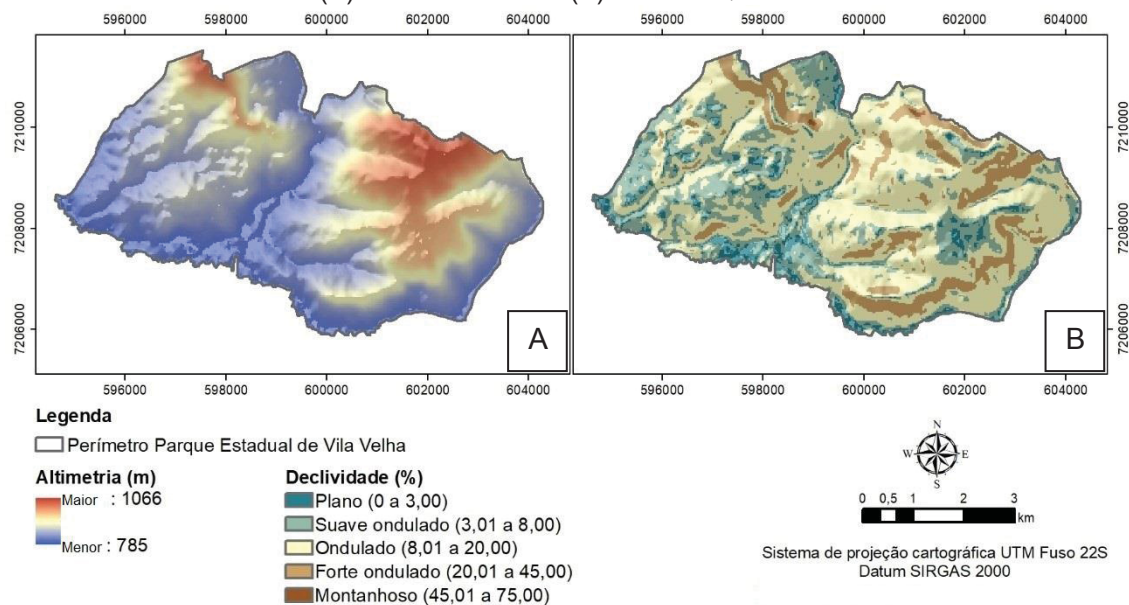


FONTE: Adaptado de IAP (2004).

A altitude varia de 785 a 1066 metros (FIGURA 3A). A porção mais elevada do parque (acima de 1000 metros) está localizada ao norte e é denominada de Platô da Fortaleza, caracterizada pela extensa ocorrência de refúgios vegetacionais rupestres.

O relevo predominante é ondulado (8 a 20% de declividade), com aproximadamente 61% de abrangência, sendo ausente a classe escarpado (> 75% de declividade) (FIGURA 3B).

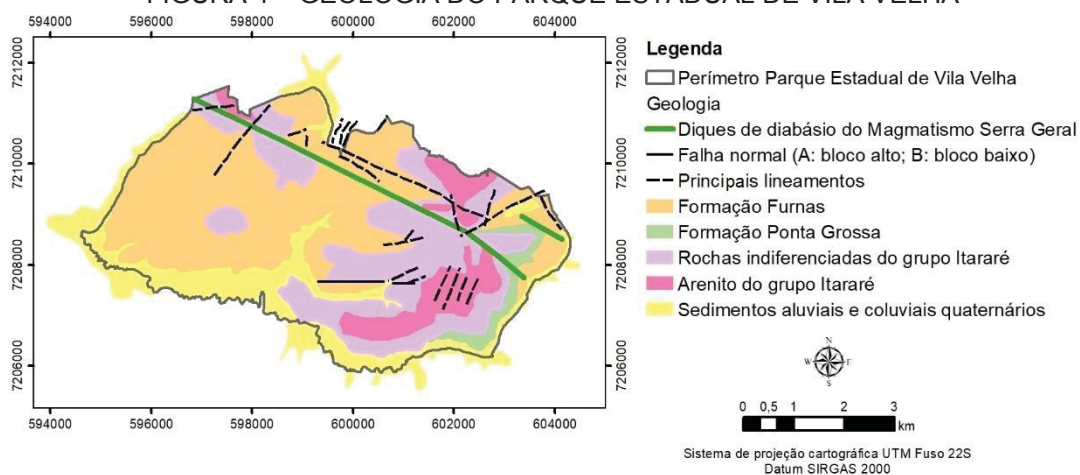
FIGURA 3 – ALTIMETRIA (A) E DECLIVIDADE (B) DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA



FONTE: INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) (2011), elaborado pela autora (2020).

Com relação aos aspectos geológicos (FIGURA 4), de acordo com Melo (2006), as rochas que ocorrem dentro do perímetro do PEVV e entorno pertencem às unidades mais antigas da Bacia do Paraná, sendo: formações Furnas e Ponta Grossa (Devoniano) e Grupo Itararé (Carbonífero-permiano), além de diques de diabásio do magmatismo Serra Geral (Eocretáceo) e sedimentos aluviais e coluviais quaternários.

FIGURA 4 – GEOLOGIA DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA



FONTE: Adaptado de IAP (2004).

A região dos Campos Gerais se apresenta como formas relictuais de um antigo clima semiárido pleistoceno, constituindo, assim a formação florística mais antiga do estado do Paraná (MAACK, 2012). A região é caracterizada por extensas áreas de campos abertos com elevada homogeneidade fisionômica, predominantemente herbácea, desprovida ou com pouca densidade de arbustos, por formações florestais que ocorrem em vales, depressões e áreas marginais a rios ou riachos, ou então na forma de campões em locais com solos mais profundos (MORO; CARMO, 2007; SEGER *et al.*, 2013) e, ocasionalmente, por fragmentos de Cerrado (savana) (MORO; CARMO, 2007).

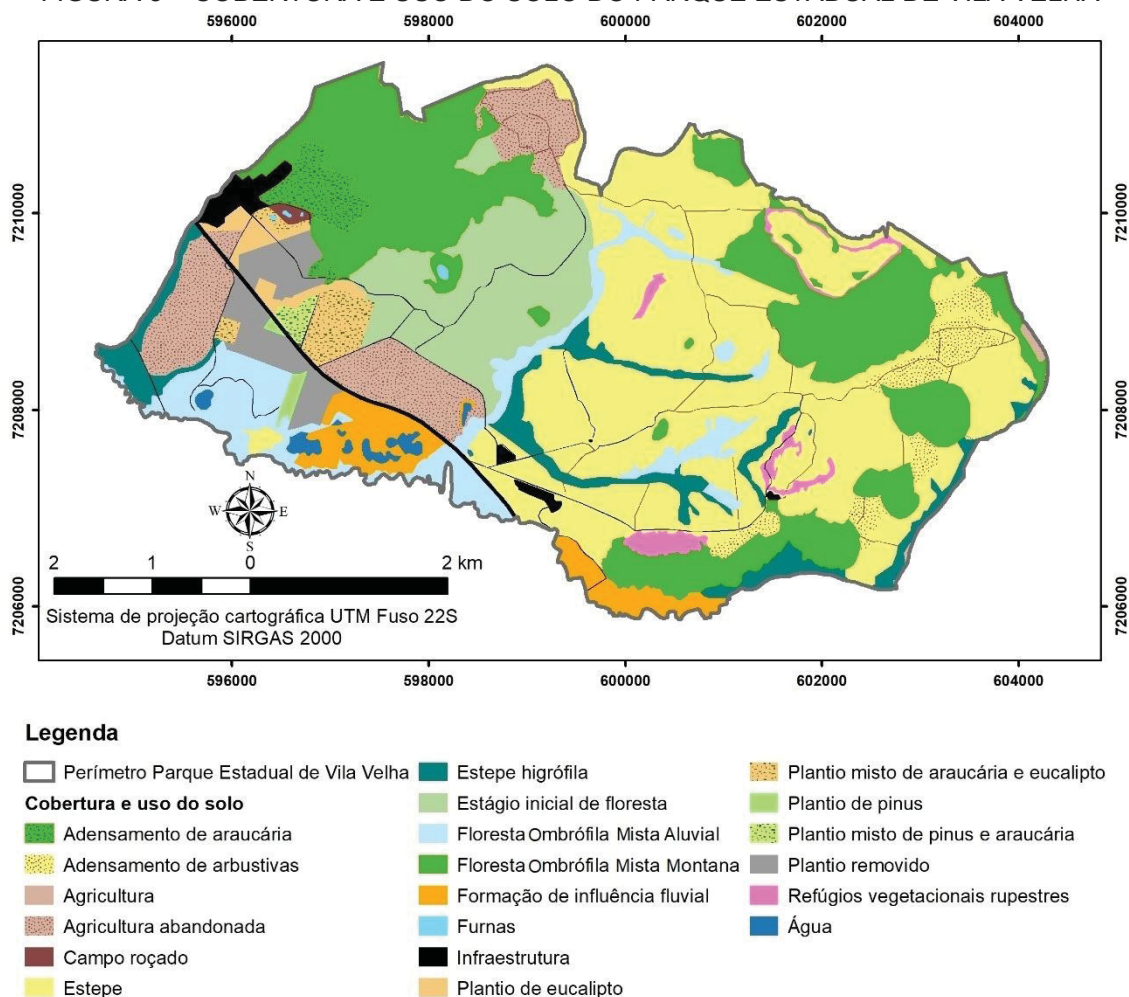
Primitivamente, a região de campos sul-brasileiros foi designada como savanas, porém Maack (2012) retificou o termo para “estepe de gramíneas baixas”, devido às condições climáticas e formações florísticas da região. Entretanto, há autores que ainda defendem o uso do termo “savana gramíneo-lenhosa” para as formações abertas dos Campos Gerais, uma vez que esta apresenta semelhança florística com as áreas de savana da região nordeste do estado (CERVI *et al.*, 2007).

Atualmente, segundo o IBGE (2012), o termo “estepe” foi adotado para referir-se aos campos brasileiros distribuídos desde o contato com a região de Cerrado nas adjacências do município de Ponta Grossa – PR até o extremo sul do país. Segundo Ziller (2000), seis formações podem ser observadas na região dos Campos Gerais, inclusive no Parque Estadual de Vila Velha (IAP, 2004) (FIGURA 5), sendo:

- a) Estepe *stricto sensu*: também denominada de campos secos ou campos limpos, são compostos por vegetação herbáceo-arbustiva.
- b) Estepe higrófila: ou campos úmidos, corresponde às áreas de fisionomia predominantemente herbácea em locais com presença de água;
- c) Refúgios vegetacionais rupestres: vegetação diretamente associada aos afloramentos de arenito dos campos gerais;
- d) Formações pioneiras de influência fluvial: também de fisionomia herbáceo-arbustiva, associados ou não a cursos d'água, constituindo basicamente os brejos e várzeas;
- e) Floresta Ombrófila Mista Montana: ou floresta com araucária, tipicamente representada por capões no campo, em geral formados ao redor de nascentes ou cursos d'água;

- f) Floresta Ombrófila Mista Aluvial: ou floresta de galeria, desenvolvida predominantemente sobre Neossolos Flúvicos e solos com hidromorfia ao longo de cursos d'água e intensamente influenciada pelas variações do regime hídrico dos rios.

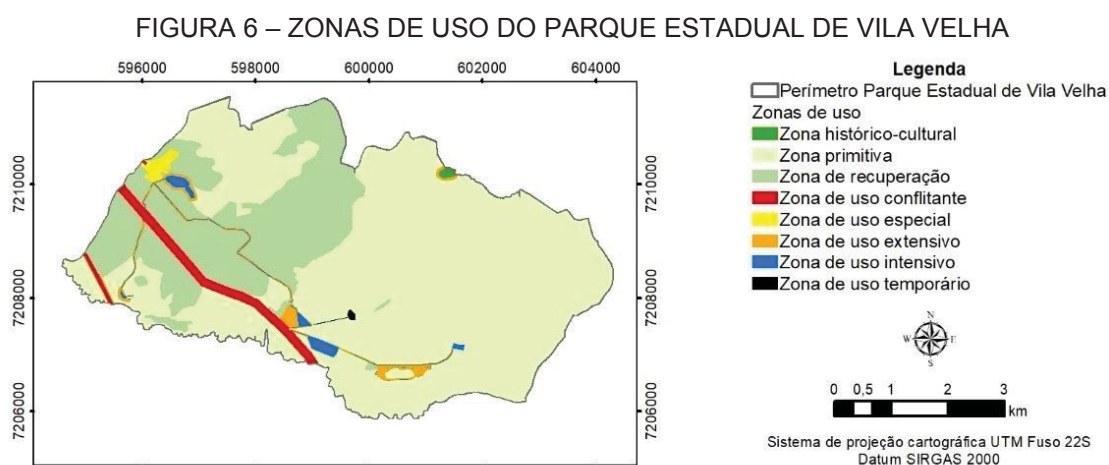
FIGURA 5 – COBERTURA E USO DO SOLO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA



FONTE: Adaptado de IAP (2004).

Segundo IAP (2004), na porção oeste do parque, onde antes havia formação campestre, foi implantada pelo IAPAR na década de 1960 áreas experimentais de cultivos florestais, compostas principalmente por pinus, eucalipto e araucária. Por um período de 35 anos outras áreas também foram utilizadas para experimentação agrícola, o que comprometeu suas características edáficas e florísticas. Atualmente, essas áreas encontram-se em processo de restauração.

Cabe destacar o zoneamento do Parque Estadual de Vila Velha, apresentado em seu plano de manejo, onde estão definidas oito zonas de uso (FIGURA 6) (IAP, 2004). Dentre essas destaca-se a zona primitiva, que representa cerca de 70% da área do parque e refere-se a locais em que ocorreram poucas intervenções antrópicas, ou então, que contenham ambientes sensíveis ou vulneráveis. Estas áreas contêm maior grau de conservação, naturalidade e importância ecológica, comparada às demais zonas.



FONTE: Adaptado de IAP (2004).

## 4.2 HISTÓRICO DE FOGO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA

O histórico de fogo do Parque Estadual de Vila Velha foi embasado na metodologia de Wittkuhn e Hamilton (2010), Alvarado *et al.* (2017) e Batista *et al.* (2018).

Primeiramente foram determinadas as cicatrizes de incêndios e queimas controladas referentes ao período de 1997 a 2018, obtidas de imagens dos satélites Landsat 5 *Thematic Mapper* (TM), Landsat 7 *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) e Landsat 8 *Operational Land Imager* (OLI), extraídas do banco de dados *Earth Explorer*, da *United States Geological Survey* (USGS, 2019). A diferenciação entre cicatrizes provenientes de incêndio florestal e queima controlada foi realizada com auxílio de informações (data, local e tamanho de área queimada) sobre as queimas executadas, fornecidas pela gestão do parque.



Conforme Alvarado *et al.* (2017), as cicatrizes são observáveis até duas imagens consecutivas (até 30 dias) para a estação chuvosa e até cinco imagens consecutivas para a estação seca (superior a 60 dias). Assim, optou-se pela aquisição de imagens mensais para o período de estudo (264 meses).

A demarcação das cicatrizes foi realizada pela interpretação visual da composição falsa cor das imagens Landsat, para os sensores TM e ETM+. A composição *Red-Green-Blue* utilizada foi: banda 5 (1550-1750 nm), banda 4 (760-900 nm), banda 3 (630-690 nm), enquanto para sensor OLI: banda 6 (1570-1650 nm), banda 5 (850-880 nm) e banda 4 (640-670 nm).

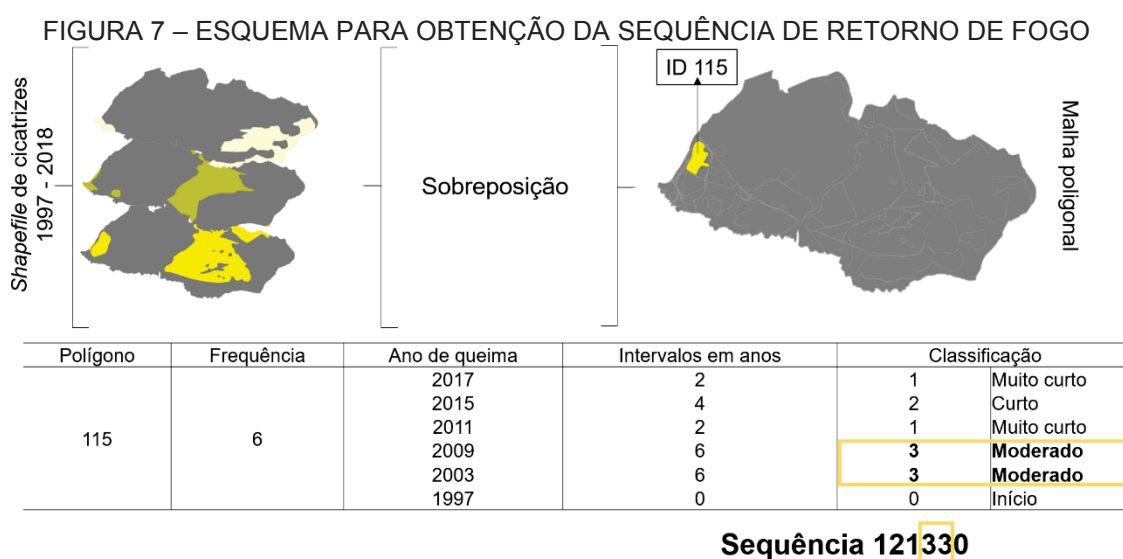
As cicatrizes de fogo apresentam distinto aspecto visual em relação à maioria dos demais tipos de cobertura de solo, entretanto se assemelham às rochas expostas (ALVARADO *et al.*, 2017), nuvens, cursos d'água, sombras ou características topográficas (BATISTA *et al.*, 2018), o que dificulta o uso de algoritmos de classificação automatizada.

Após a demarcação das cicatrizes, os eventos referentes aos incêndios foram divididos em cinco categorias de tamanho: I ( $\leq 0,09$  ha); II (0,1 a 4,0 ha); III (4,1 a 40,0 ha); IV (40,1 a 200,0 ha); e V ( $> 200,0$  ha) (RAMSEY; HIGGINS, 1981).

Para cada ano foi elaborado um *shapefile* das cicatrizes, para os quais constavam na tabela de atributos as seguintes informações: tamanho da área (em hectares), se houve presença de fogo no polígono ou não (1 - área queimada; 0 - área não queimada), ano e mês em que a cicatriz foi observada. Em seguida os *shapefiles* foram unidos por meio da ferramenta *union* do *Arcgis 10.5*, resultando em uma única malha poligonal para o período de 1997 a 2018. A tabela de atributos dessa malha poligonal foi exportada para planilha Excel, em que foram calculados para cada polígono a frequência de ocorrência de fogo (quantas vezes houve fogo em cada polígono), o tempo decorrido desde a última queima e os intervalos de retorno de fogo (ANEXO 1).

O mapa, referente ao tempo decorrido desde a última ocorrência de fogo, indica o número de anos desde a última queima ou incêndio em cada polígono, sendo 2018 o “ano 1” e 1997 o “ano 22”. Segundo Alvarado *et al.* (2017), esse fator pode ser visto como uma medida indireta do acúmulo de material combustível, fundamental para determinar o perigo de incêndios e prever a intensidade do fogo.

Os intervalos de retorno de fogo (em anos), que foram classificados e sequenciados (WITTKUHN; HAMILTON, 2010; ALVARADO *et al.*, 2017). A classificação foi realizada conforme o proposto por Alvarado *et al.* (2017), sendo: muito curto (código 1 = queimado a cada 1-2 anos), curto (código 2 = queimado a cada 3-5 anos), moderado (código 3 = queimado a cada 6-10 anos) e longo (código 4 = superior a 11 anos). Para cada polígono foi montada uma sequência de retorno. Por exemplo (FIGURA 7), o ID 115 queimou 6 vezes: i) 2017; ii) 2015; iii) 2011; iv) 2009; v) 2003 e vi) 1997, logo os intervalos foram de 2; 4; 2; 6 e 6 anos, que reclassificados resultaram na sequência 12133.



FONTE: A autora (2020).

Posteriormente, as sequências foram classificadas devido aos menores prazos considerados, segundo Alvarado *et al.* (2017): a) intervalo de retorno de incêndio incompleto (único fogo observado); b) intervalo único de incêndio muito curto/curto (queimado duas vezes com um intervalo muito curto ou curto); c) intervalo único de incêndio moderado/longo (queimado duas vezes com um intervalo moderado ou longo); d) intervalo de retorno de incêndio muito curto (mais de dois incêndios, com tempo de retorno de 1 a 2 anos); e) intervalo de retorno de incêndio curto (mais de dois incêndios, com tempo de retorno de 3 a 5 anos); f) intervalo de retorno de incêndio moderado (mais de dois incêndios, com tempo de retorno de 6 a 10 anos); g) intervalo de retorno de incêndio misto (mais de dois incêndios, com tempos de retorno variáveis).

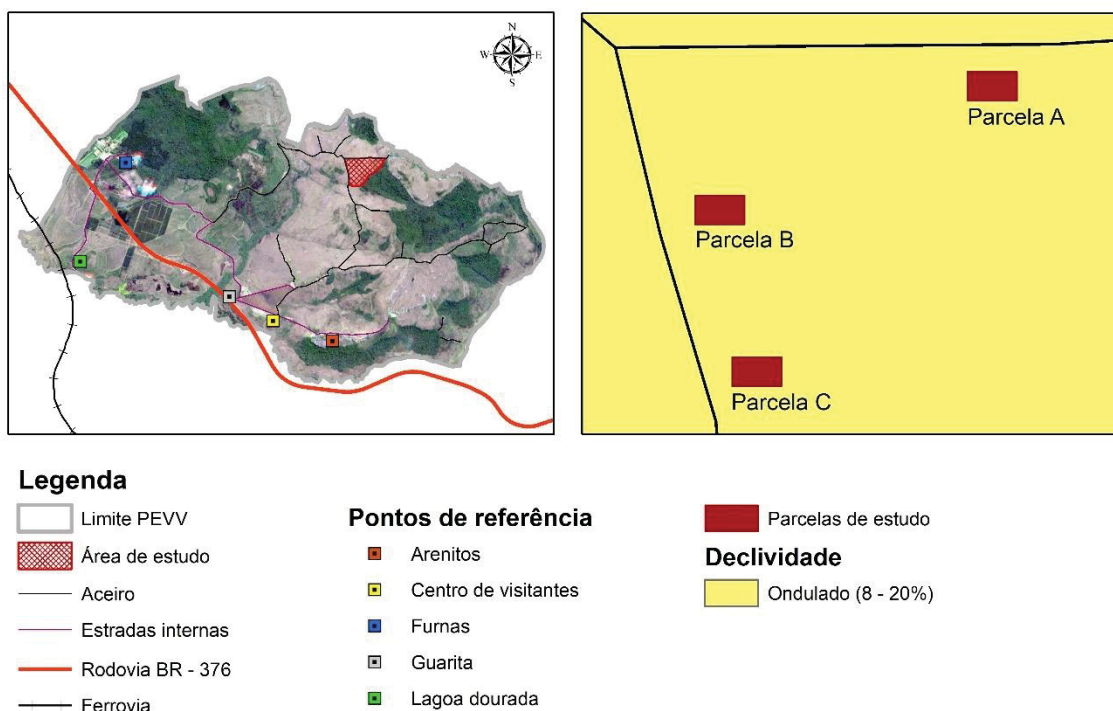
### 4.3 REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE CAMPO

Os experimentos foram realizados na porção norte do Parque, em três locais distintos, como representado na Figura 8.

FIGURA 8 – LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO PARA REALIZAÇÃO DE QUEIMAS

Localização da área de estudo

Localização das parcelas de estudo



FONTE: A autora (2020).

Para a localização das parcelas foram considerados como critérios fundamentais: vegetação, conservação da área, declividade do terreno, orientação das curvas de nível, sentido predominante do vento, acessibilidade, calendário de queima do parque e histórico de ocorrência de incêndio.

A tipologia em estudo foi a estepe *stricto sensu*. A vegetação é de predominância herbácea, com plantas de porte arbustivo e arbóreo distribuídas de forma esparsa (FIGURA 9). De acordo com Seger *et al.* (2018), em locais de estepe em condições semelhantes, o estrato herbáceo é composto por 9,97% de material vivo (com 100,43% de teor médio de umidade), 55,16% de material seco (com 26,99% teor médio de umidade) e 34,87% de miscelânea (com 25,66% teor médio de umidade), no período de inverno.



FIGURA 9 – VEGETAÇÃO DE ESTEPE *stricto sensu* (CAMPOS SECOS) DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA



FONTE: A autora (2020).

FONTE: BATISTA (2017).

A área de estudo localiza-se na zona de uso primitivo do parque, área não destinada a visitação. Essa zona refere-se a locais em que ocorreu pequena ou mínima intervenção antrópica, de importância para conservação (IAP, 2004).

O sentido predominante do vento é nordeste, com velocidade média variando de 3 a 4 m.s<sup>-1</sup>. A classe de declividade predominante na área de estudo é “ondulado” (8 a 20%). Buscou-se instalar as parcelas de forma paralela às curvas de nível e em áreas de mesma inclinação, com o intuito de reduzir a interferência da inclinação no comportamento do fogo.

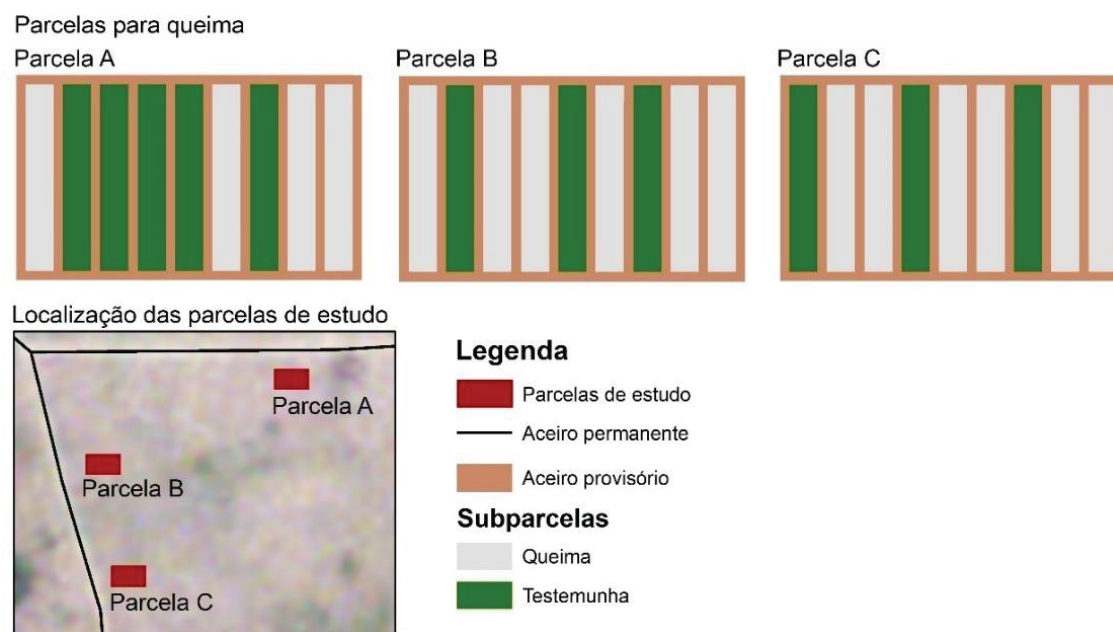
A fim de facilitar a logística e reduzir os impactos causados pela abertura de aceiro provisórios, optou-se pela instalação das parcelas próximas aos aceiros permanentes do parque.

Conforme o registro de ocorrência de incêndios florestais do parque, o último evento de fogo que ocorreu na área de estudo foi em novembro de 1999, o qual atingiu uma área de 686,1 ha, aproximadamente.

#### 4.3.1 Queimas controladas

Para realização das queimas controladas foram delimitadas três parcelas, com aproximadamente 0,08 ha cada, na porção norte do parque e cada área foi dividida em 9 subparcelas (3 x 20 m). A determinação das subparcelas a receberem o tratamento foi realizada de modo aleatório, por sorteio. No total, 16 subparcelas foram designadas para a queima, enquanto as demais permaneceram como testemunhas (FIGURA 10).

FIGURA 10 – CROQUI DAS PARCELAS DESTINADAS À QUEIMA



FONTE: A autora (2020).

Como medidas preventivas e para delimitação foram confeccionados aceiros provisórios de 1 metro de largura, com auxílio de equipamentos motorizados (moto-roçadeira) e manuais (rastelo, enxada e pá) (FIGURA 11).

FIGURA 11 – ABERTURA DE ACEIROS TEMPORÁRIOS



FONTE: A autora (2020).

Além da brigada de incêndios do parque, a equipe de pesquisadores do Laboratório de Incêndios Florestais da UFPR acompanhou os experimentos com equipamentos manuais de combate (FIGURA 12).

FIGURA 12 – REALIZAÇÃO DAS QUEIMAS CONTROLADAS



FONTE: A autora (2020).

Antes da execução das queimas foram retiradas amostras do material combustível herbáceo em três pontos distintos ao longo de cada subparcela, com auxílio de um gabarito (20 x 20 cm), para determinação da carga de material combustível (em  $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) e teor de umidade do mesmo (em %) (FIGURA 13).

FIGURA 13 – COLETA DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO



FONTE: A autora (2020).

O material foi identificado e armazenado em sacos tipo *ziploc*, para reduzir a perda de umidade. Em laboratório, foi obtida a massa úmida de cada amostra e em seguida essas permaneceram em estufas a 75 °C por 48 horas, para obtenção de sua massa seca. O teor de umidade foi calculado conforme a equação a seguir (COUNTRYMAN, 1974):



$$TU = \left( \frac{Mu - Ms}{Ms} \right) * 100$$

Em que:

$TU$  – teor de umidade, em %;

$Mu$  – massa úmida, em g;

$Ms$  – massa seca, em g.

A técnica utilizada foi queima contra o vento, sendo essas realizadas no final do inverno, em duas fases: a) 31 de agosto de 2017, com início às 10h40 e término às 18h20; b) 4 de setembro de 2017, com início às 10h20 e término às 11h15. Buscou-se enquadrar as condições ambientais dentro dos limites recomendados (TABELA 3):

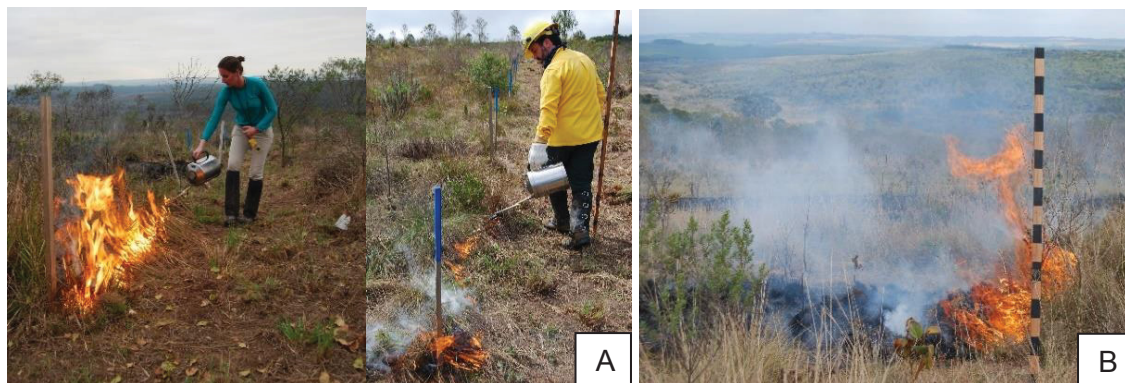
TABELA 3 – LIMITES RECOMENDADOS PARA AS VÁRIÁVEIS AMBIENTAIS PARA A EXECUÇÃO DE QUEIMAS CONTROLADAS

Variável	Mínimo	Desejável	Máximo
Condições meteorológicas			
Número de dias sem chuva	1 <sup>a</sup>	3 - 7 <sup>a</sup>	10 <sup>b</sup>
Temperatura (°C)	5 <sup>ac</sup>	8 - 20 <sup>a</sup> 15 <sup>c</sup>	25 <sup>ac</sup>
Umidade relativa (%)	20 <sup>a</sup> 35 <sup>c</sup>	30 - 70 <sup>a</sup> 45 <sup>c</sup>	85 <sup>a</sup> 65 <sup>c</sup>
Velocidade do vento (km/h)	1 <sup>a</sup> 2 <sup>c</sup>	5 - 15 <sup>a</sup> 15 <sup>c</sup>	20 <sup>a</sup> 25 <sup>c</sup>
Material combustível			
Umidade de combustível de 1 hora (%)	5 <sup>c</sup>	7 <sup>c</sup>	10 <sup>c</sup>
Umidade de combustível herbáceo vivo (%)	50 <sup>c</sup>	100 <sup>c</sup>	125 <sup>c</sup>
Comportamento do fogo			
Velocidade de propagação do fogo (m/min)	<1,5 <sup>a</sup> 0,1 <sup>c</sup>	1,5 - 4,5 <sup>a</sup> 1 <sup>c</sup>	7,5 <sup>a</sup> 5 <sup>c</sup>
Comprimento da chama (m)	<1 <sup>a</sup> 0,3 <sup>c</sup>	1 - 4 <sup>a</sup> 0,5 - 1 <sup>c</sup>	5,5 <sup>a</sup> 1,5 - 2 <sup>c</sup>

FONTES: FERNANDES; BOTELHO; LOUREIRO, (2002)<sup>a</sup>; SEGER *et al.* (2013)<sup>b</sup>; DELGADO; FABABÚ; AZCÁRATE (s.d.)<sup>c</sup>, elaborado pela autora (2020).

A ignição inicial foi realizada com auxílio de um pinga-fogo, contendo um composto inflamável formado por diesel e gasolina, na proporção 3:1, de modo a formar uma linha paralela à largura da subparcela, na extremidade oposta ao sentido do vento. A coleta de informações sobre comportamento do fogo foi realizada de forma sistemática, com pontos de leitura espaçados 2 metros entre si e demarcados com uma baliza de 2 metros de altura, graduada a cada 10 cm. Desse modo foram feitas 10 observações por parcela (FIGURA 14).

FIGURA 14 – REALIZAÇÃO DAS QUEIMAS CONTROLADAS CONTRA O VENTO COM USO DE PINGA-FOGO (A) E OBTENÇÃO DE ALTURA DE CHAMA (B)

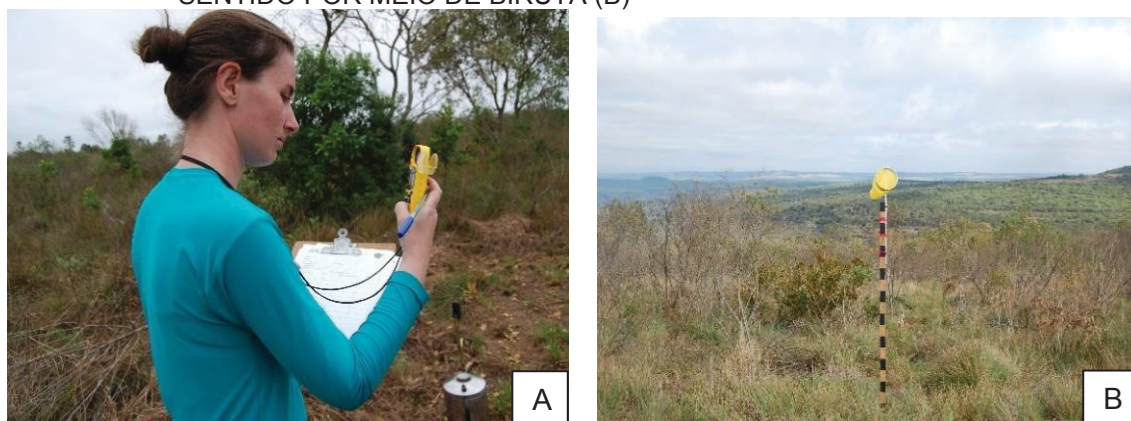


FONTE: A autora (2020).

As informações obtidas durante as queimas foram: a) tempo de propagação, em segundos, obtido com auxílio de um cronômetro (corresponde ao tempo em que 50% da frente de chama levou para percorrer a distância de 2 metros, considerando os pontos pré-determinados), utilizado posteriormente para o cálculo da velocidade de propagação do fogo ( $\text{m.s}^{-1}$ ); b) altura de chama, em centímetros, obtido de forma direta pelo observador com auxílio de uma baliza (trata-se da altura média alcançada pelas chamas, registrada a cada 2 metros, em pontos pré-determinados).

No início e término de cada queima foram anotados horário e velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ), obtidos por meio de uma miniestação meteorológica portátil Kestrel 4500® (FIGURA 15A). Durante as queimas, o sentido do vento foi monitorado com auxílio de uma biruta, localizada próximo à área de queima e a 2 metros de altura (FIGURA 15B). Ademais, foram obtidos dados horários de temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ) e precipitação (mm) para o período de 18 de agosto de 2017 a 6 de setembro de 2017, da estação meteorológica do SIMEPAR (2017), localizada na área do parque.

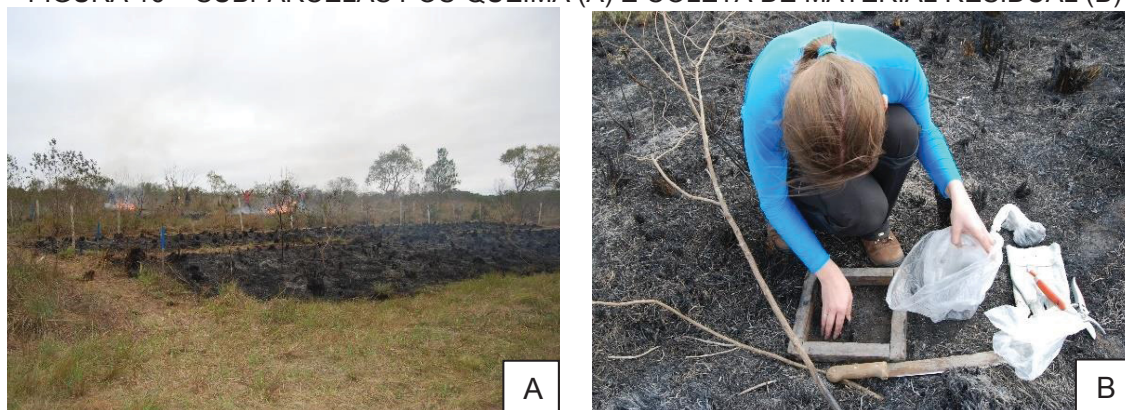
FIGURA 15 – ACOMPANHAMENTO DA VELOCIDADE DO VENTO (A) E OBTENÇÃO DO SEU SENTIDO POR MEIO DE BIRUTA (B)



FONTE: A autora (2020).

Após as queimas, foram coletadas amostras do material residual em três pontos distintos ao longo de cada subparcela, com auxílio de um gabarito (20 x 20 cm), para determinação do material combustível disponível (FIGURA 16). As amostras foram acondicionadas em sacos tipo *ziploc* e encaminhadas ao laboratório para obtenção de sua massa.

FIGURA 16 – SUBPARCELAS PÓS-QUEIMA (A) E COLETA DE MATERIAL RESIDUAL (B)



FONTE: A autora (2020).

Com base nos valores obtidos da média de velocidade de propagação do fogo e da quantidade de material combustível disponível em cada subparcela, calculou-se a intensidade da linha de fogo por meio da equação de Byram (1959). Para tanto, adotou-se um poder calorífico de  $3875 \text{ kcal.kg}^{-1}$  referente a vegetação campestre (GRIFFIN; FRIEDEL, 1984), recomendado por Pivello *et al.* (2010) e Seger *et al.* (2013).

$$I = H * w * r$$

Em que:

$I$  – intensidade da linha de fogo, em  $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ;

$H$  – poder calorífico, em  $\text{kcal.kg}^{-1}$ ;

$w$  – massa do combustível disponível, em  $\text{kg.m}^{-2}$ ;

$r$  – velocidade de propagação do fogo, em  $\text{m.s}^{-1}$ .

Segundo Soares, Batista e Tetto (2017), o teor de umidade presente no material combustível interfere em seu poder calorífico, deste modo fez-se necessário um ajuste por meio da seguinte equação:

$$Hw = Hd * \left( \frac{100 - \frac{TU}{7}}{100 + TU} \right)$$

Em que:

$Hw$  – poder calorífico do material combustível úmido, em  $\text{kcal.kg}^{-1}$ ;

$Hd$  – poder calorífico do material combustível seco, em  $\text{kcal.kg}^{-1}$ ;

$TU$  – teor de umidade do material combustível, em %.

O calor liberado por unidade de área foi calculado por meio da seguinte equação:

$$H_a = \frac{I}{r}$$

Em que:

$H_a$  – calor liberado, em  $\text{kcal.m}^{-2}$ ;

$I$  – intensidade da linha de fogo, em  $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ;

$r$  – velocidade de propagação do fogo, em  $\text{m.s}^{-1}$ .

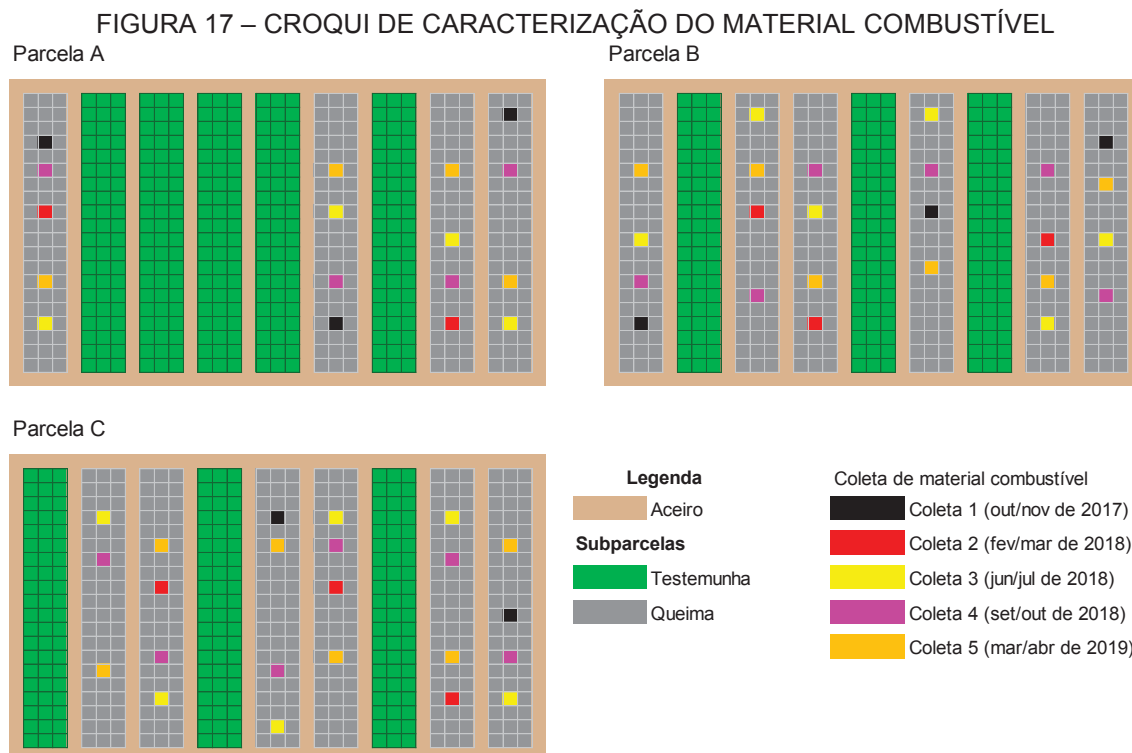
Os dados obtidos foram processados em planilhas (Microsoft Excel) e analisados estatisticamente por meio do *software* Statgraphics Centurion XI, no qual foram desenvolvidos teste de comparação de médias Student-Newman-Keuls (SNK) e análise de variância.

#### 4.3.2 Monitoramento do material combustível fino

Foram realizadas cinco campanhas de campo, ao longo de 19 meses, sendo:

- 1) novembro/dezembro de 2017 – 3 meses após a queima, verão.
- 2) fevereiro/março de 2018 – 6 meses após a queima, início de outono;
- 3) junho/julho de 2018 – 10 meses após a queima, período de inverno;
- 4) setembro/outubro de 2018 – 13 meses após a queima, inverno/primavera;
- 5) março/abril de 2019 – 19 meses após a queima, início de outono.

Os pontos de coleta foram assinalados em croqui, de modo a não sobrepor as áreas amostradas, conforme a Figura 17.



FONTE: A autora (2020).



A metodologia empregada para a quantificação do material combustível é denominada de “amostragem destrutiva”, visto que se retira toda a biomassa presente em uma área pré-definida e a classifica de acordo com diâmetro e estado fisiológico. Descrito por Brown, Oberheu e Johnston (1981), esse método vem sendo utilizado por diversos pesquisadores para caracterização de material combustível, tanto em cultivos florestais (e.g. SOUZA; SOARES; BATISTA, 2003; BEUTLING *et al.*, 2005 e 2012; WHITE; RIBEIRO; SOUZA, 2014), como em distintas tipologias (e.g. MELO *et al.*, 2006; WHITE *et al.*, 2014; SEGER *et al.*, 2018; RODRIGUES, 2018; MOREIRA, 2019).

O coleta da carga de combustível foi designado ao material combustível fino superficial. As coletas foram realizadas com auxílio de um gabarito de 1 m<sup>2</sup> e o material coletado foi classificado de acordo com as seguintes categorias:

- a) material combustível vivo com diâmetro menor ou igual a 0,7 cm, incluindo material herbáceo, até 1,80 m de altura;
- b) material combustível morto ou seco com diâmetro menor ou igual a 0,7 cm, incluindo material herbáceo, até 1,80 m de altura;
- c) miscelânea.

Após a separação do material combustível, foi obtida a massa úmida total de cada classe contida na parcela de 1 m<sup>2</sup>, por meio de um dinamômetro analógico (FIGURA 18). Em seguida foi retirada uma amostra de cada classe, armazenada em sacos tipo *ziploc*, para reduzir a perda de umidade, e encaminhada para laboratório.

FIGURA 18 – CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO: DELIMITAÇÃO DA PARCELA (A); SEPARAÇÃO DO MATERIAL VIVO E MORTO (B); RETIRADA DE MISCELÂNEA (C); E OBTENÇÃO DA MASSA TOTAL PARA CADA CLASSE (D)





FONTE: A autora (2020).

Os procedimentos laboratoriais consistiram na obtenção da massa úmida de cada amostra, por meio de uma balança, secagem do material em estufa a 75 °C por 48 horas e obtenção da massa seca (FIGURA 19).

FIGURA 19 – OBTENÇÃO DA MASSA ÚMIDA DE AMOSTRA DE COMBUSTÍVEL (A); SECAGEM EM ESTUFA DO MATERIAL (B); E OBTENÇÃO DA SUA MASSA SECA (C)



FONTE: A autora (2020).

Posteriormente foram calculados seus respectivos teores de umidade, por meio da equação a seguir (COUNTRYMAN, 1974):

$$TU = \left( \frac{Mu - Ms}{Ms} \right) * 100$$

Em que:

$TU$  – teor de umidade, em %;

$Mu$  – massa úmida, em g;

$Ms$  – massa seca, em g.

Com o teor de umidade de cada amostra conhecido, foi possível extrapolar os valores de material combustível seco, por classe e total, para o hectare.

A suficiência de amostragem foi realizada por meio do método sequencial de Stein, segundo o exposto por Seger (2015):

$$N = \left( \frac{t^2 \cdot s^2}{E^2} \right)$$

Em que:

$N$  – número de amostras;

$t^2$  – valor de t da tabela de Student;

$s^2$  – variância;

$E^2$  – erro amostral (sendo de 0,20).

#### 4.4 MODELO DE COMBUSTÍVEL PARA ESTEPE *stricto sensu* DO PEVV – FARSITE

O modelo combustível para a estepe *stricto sensu* do PEVV teve como foco a simulação de progressão espacial de fogo e de suas variáveis de comportamento no FARSITE, incluso no programa FlamMap 6.0. O *software* inclui 13 modelos de combustíveis originais (ANDERSON, 1982), 40 modelos adicionais (SCOTT; BURGAN, 2005) e também permite a confecção de modelos



de combustível específicos. Deste modo, com base em informações disponíveis sobre a caracterização do material combustível para a tipologia semelhante à da área de estudo, foi elaborado um modelo próprio para área de estepe *stricto sensu* do Parque Estadual de Vila Velha (PEVV) (TABELA 4).

TABELA 4 – MODELO DE COMBUSTÍVEL INSERIDO NO FARSITE PARA ESTEPE *stricto sensu*

Code	Carga de combustível (Mg.ha <sup>-1</sup> )					Tipo	SAV taxa (1/cm)			Altura da manta (cm)	Umidade de extinção (%)	Poder calorífico (kJ/kg)	
	1h	10h	100h	VivoH	VivoW		SAV1	SAVLh	SAVLw			PC Morto	PC Vivo
14	7,0	0,09	0	1,2	0,63	Dinâmico	49	59	49	60	20	16270	16270

FONTE: Adaptado pela autora (2020).

NOTA: h – hora; VivoH – material herbáceo vivo; VivoW – material lenhoso vivo; SAV1 – razão superfície volume material morto 1h; SAVLh – razão superfície volume herbáceo vivo; SAVLw – razão superfície volume lenhoso vivo.

A estepe *stricto sensu* do PEVV está presente em áreas bem drenadas, é composta predominantemente por herbáceas, que geralmente acumulam biomassa de alta inflamabilidade, sendo os principais gêneros *Paspalum*, *Axonopus*, *Andropogon*, *Aristida*, *Eryanthus*, *Eryngium* e *Pteridium*. Estas áreas podem estar associadas a espécies lenhosas arbustiva composta principalmente pelos gêneros *Baccharis*, *Vernonia*, *Senecio* e *Eupatorium* (MORO; CARMO, 2007), em diferentes densidades. A quantidade de material combustível para o modelo de estepe do PEVV foi embasada em levantamento realizado por Seger (2016), para o período de inverno na mesma área de estudo.

Scott e Burgan (2005) sugerem modelos dinâmicos, que significa que a carga herbácea se desloca entre vivo e morto conforme o teor de umidade do material herbáceo vivo:

- Se o conteúdo de umidade do material herbáceo vivo for igual ou superior a 120%, os combustíveis herbáceos são considerados verdes e toda carga herbácea fica na categoria viva, com teor de umidade especificado;
- Se o teor de umidade do material herbáceo vivo for igual ou inferior a 30%, os combustíveis herbáceos são considerados secos e toda a carga é transferida para classe herbáceo morto;
- Se o teor de umidade do material combustível herbáceo vivo estiver entre 30 e 120%, então parte dele é transferida para classe herbáceo morto, segundo a Tabela 5.

TABELA 5 – PORCENTAGEM DE MATERIAL HERBÁCEO VIVO CONSIDERADO COMO SECO SEGUNDO O SEU TEOR DE UMIDADE

Porcentagem de material considerado seco ( <i>level of curing</i> )	Conteúdo de umidade do material herbáceo vivo (%)
0	≥ 120
25	98
35	90
50	75
66	60
75	53
100	≤ 30

FONTE: SCOTT; BURGAN (2005)

Os valores da relação superfície-volume foram determinados segundo o modelo 3 (ANDERSON, 1982) pré-existente. Mistry e Berardi (2005) utilizaram valores entre 90 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> (SAV1) e 39 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> (SAVLh e SAVLw), para distintas fisionomias de Cerrado, enquanto Fernandes (2003) aplicou valores entre 50 a 60 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> (SAV1). De acordo com Santos (2020), a umidade de extinção aproximada para gramíneas em região de estepe *stricto sensu* foi de 20%. Foi utilizado o poder calorífico determinado por Griffin e Friedel (1984) para áreas campestres.

O modelo foi testado por meio da simulação do incêndio florestal ocorrido em setembro de 2017 (descrito no item 4.4.1), uma vez que se tem conhecimento sobre o ponto de ignição e progressão real do incêndio. Esse ainda foi comparado com outros modelos de combustível para tipologia campestre contidos no programa (TABELA 6).

TABELA 6 – MODELOS DE COMBUSTÍVEIS SELECIONADOS PARA TIPOLOGIA CAMPESTRE

Code	Carga de combustível					Tipo	SAV taxa			Altura da manta (cm)	Umidade de extinção (%)	Poder calorífico (kJ/kg)	
	(Mg.ha <sup>-1</sup> )						(cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )					PC Morto	PC Vivo
	1h	10h	100h	VivoH	VivoW		Estático/ Dinâmico	SAV1	SAVLh				
FM2	4,5	2,2	1,1	0	1,1	Estático	98	59	49	30,5	14	18594	18594
FM3	6,7	0	0	0	0	Estático	49	59	49	76,2	25	18594	18594
GR5	0,9	0	0	5,6	0	Dinâmico	59	52	49	45,7	40	18594	18594
GR9	2,2	2,2	0	20,2	0	Dinâmico	59	52	49	152,4	40	18594	18594

FONTE: ANDERSON (1982) E SCOTT; BURGAN (2005)

NOTA: h – hora; VivoH – material herbáceo vivo; VivoW – material lenhoso vivo; SAV1 – razão superfície volume material morto 1h; SAVLh – razão superfície volume herbáceo vivo; SAVLw – razão superfície volume lenhoso vivo.

Segundo Anderson (1982), os modelos são descritos como:

- Modelo 2 (FM2): a propagação do fogo ocorre principalmente por meio dos combustíveis herbáceos finos, logo são incêndios de superfície em que o material herbáceo, além de detritos e troncos de arbustos mortos contribuem para a intensidade do fogo.
- Modelo 3 (FM3): predominantemente herbáceo, um terço do material combustível é composto por material seco, com altura de 1 metro e distribuído de forma contínua. Os incêndios que ocorrem nesse tipo de combustível apresentam elevada taxa de propagação sob influência do vento.

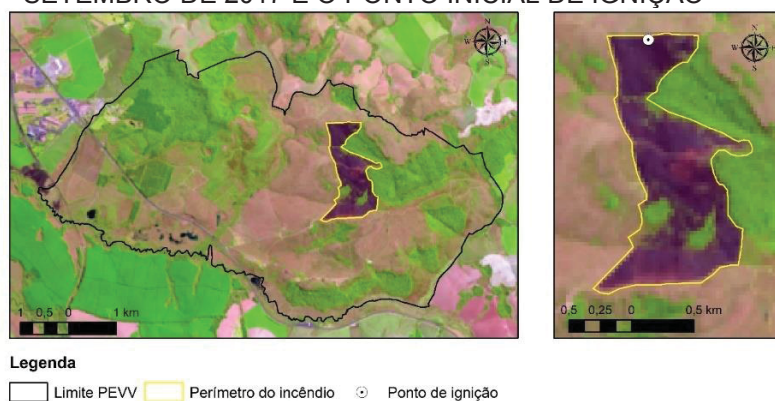
Por sua vez Scott e Burgan (2005) descrevem os modelos:

- Modelo 105 (GR5): o fogo se propaga principalmente por gramíneas de clima úmido, com altura de 30 a 60 cm e carga total de combustível fino de 6,5 Mg.ha<sup>-1</sup>.
- Modelo 109 (GR9): composto por um arranjo denso de gramíneas altas (1,8 metro), com clima úmido. A velocidade de propagação e o comprimento de chama podem ser extremos se o material combustível estiver totalmente ou praticamente seco.

#### 4.4.1 Caracterização do incêndio florestal

O incêndio ocorreu em 4 setembro de 2017, na porção leste do Parque Estadual de Vila Velha, em área de estepe *stricto sensu*, e atingiu aproximadamente 124 ha (FIGURA 20).

FIGURA 20 – PERÍMETRO DA ÁREA ATINGIDA PELO INCÊNDIO FLORESTAL DE 4 DE SETEMBRO DE 2017 E O PONTO INICIAL DE IGNIÇÃO



FONTE: IAP (2004); USGS (2019), elaborado pela autora (2020).

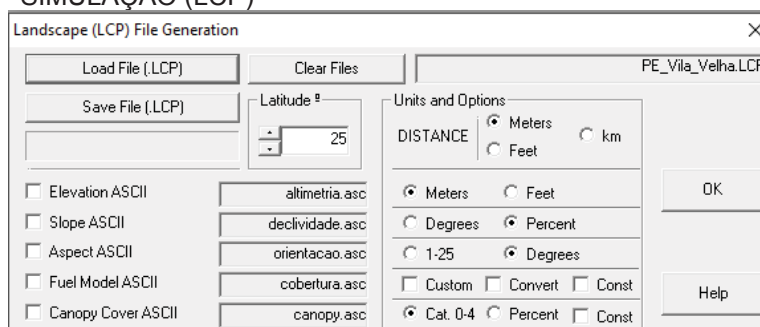
O alerta do incêndio foi dado aproximadamente às 11h do dia 4 de setembro de 2017 e o incêndio foi considerado extinto às 23h59 do mesmo dia (SYSBM, 2017). Com uma progressão auxiliada pelo vento dominante de noroeste, o incêndio consumiu material herbáceo e arbustivo e afetou áreas do ecótono com floresta ombrófila mista. Entretanto, o fogo não adentrou essas áreas devido ao teor de umidade na serapilheira, extinguindo-se. A estratégia de combate a esse incêndio englobou o uso de abafadores, bombas-costais e a técnica de contra-fogo, aplicada a partir de aceiros presentes na área.

#### 4.4.2 Parâmetros de entrada – FARSITE

O estudo utilizou o programa FlamMap 6.0, por meio do sistema incluso FARSITE, que exige informações de entrada com uma base cartográfica referente à topografia e à vegetação, em formato *raster* (ASCII), elaboradas no *Arcgis 10.5*. As principais variáveis de entrada em formato *raster* foram: cobertura de copa, modelo de material combustível, declividade, orientação de encostas e elevação (FIGURA 21). O programa ainda permite simular a atividade de incêndio de copa, adicionando informações sobre altura das árvores, altura da base da copa e densidade aparente das copas. Entretanto, como não houve incidência de incêndio de copa no presente estudo, essas informações não foram adicionadas.

Cada imagem *raster* foi inserida no FlamMap para formar uma única composição denominada *Landscape file* (LCP), descrevendo assim as características fisiográficas e da vegetação potencialmente combustível.

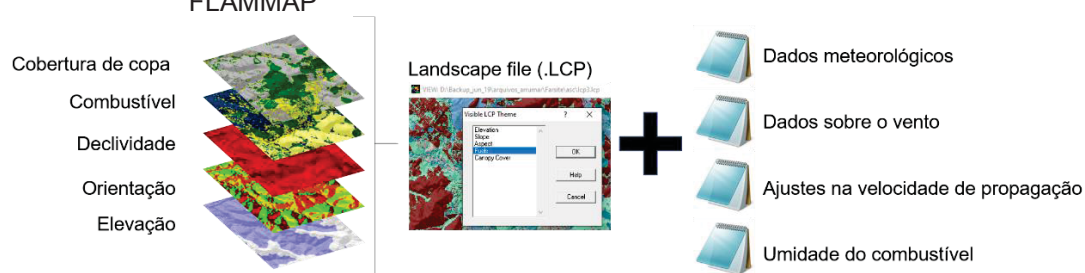
FIGURA 21 – JANELA DO PROGRAMA FLAMMAP PARA GERAR AQUIVO BASE DE SIMULAÇÃO (LCP)



FONTE: *print screen* da janela *landscape (LCP) File Generation* do FlamMap 6.0.

Além do arquivo LCP, foi necessário introduzir dados sobre a umidade do material combustível (em formato FMS) e informações meteorológicas: tempo atmosférico (WTR) e vento (WND), para o período desejado, para simular a evolução temporal e espacial do comportamento do fogo no incêndio (FIGURA 22). Essas informações podem ser incorporadas por meio de arquivos de texto (TXT). O arquivo de ajuste (ADJ) deve ser incluído, mesmo sem modificações (valores iguais a 1).

FIGURA 22 – ESQUEMA DAS INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS INTRODUZIDAS NO FLAMMAP



FONTE: A autora (2020).

Os dados meteorológicos da estação de Ponta Grossa, localizada nas coordenadas 25° 13' 1,5" S e 50° 1' 1,5" W, a aproximadamente 3 km da área de interesse, foram requisitados ao Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR, 2017). Os dados de temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m.s<sup>-1</sup>), sentido do vento (°) e precipitação (mm) foram registrados a cada 15 min, para o período de 30/08/2017 a 06/09/2017.

Para gerar o arquivo de tempo atmosférico (*weather files*), foram organizados em bloco de notas (TXT) as informações diárias: mês (MO), dia (DY), precipitação (em mm) (RN), horários em que ocorrem as temperaturas do ar mínima (AM) e máxima (PM), temperatura mínima (TL<sub>o</sub>) e máxima (TH<sub>i</sub>) do ar (em °C), umidades relativas máxima (HH<sub>i</sub>) e mínima (HH<sub>o</sub>) do ar (em %) e elevação (em metros) (ELV). Posteriormente, a extensão desse arquivo foi alterada para WTR (extensão própria do programa), para então ser inserido no FlamMap.

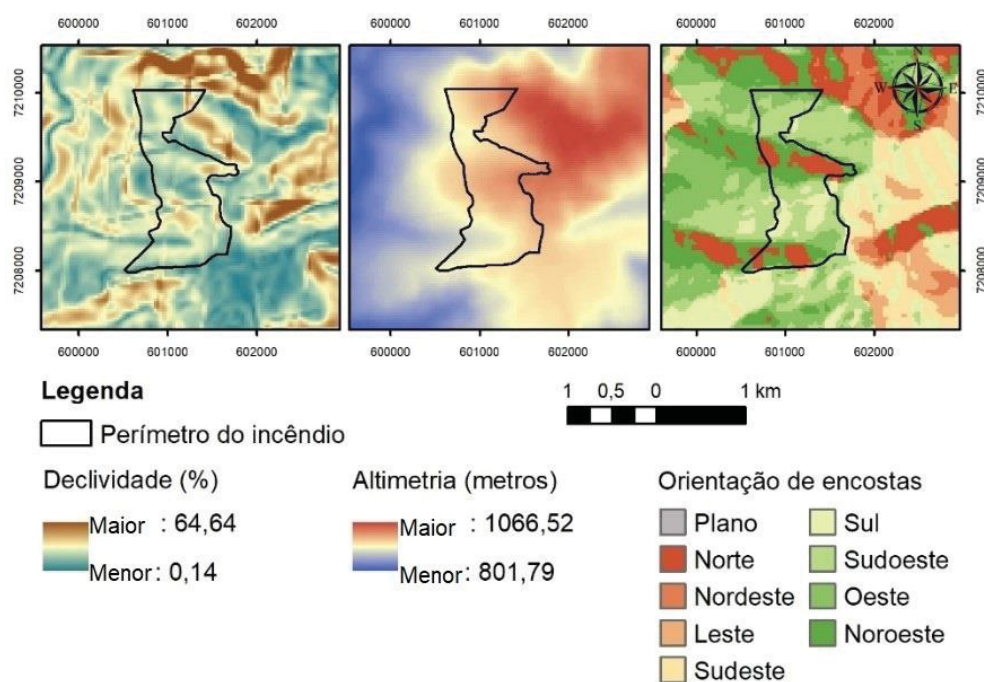
Assim como o arquivo com os dados de tempo atmosférico, o arquivo com informações sobre o vento (*wind files*) foi gerado primeiramente em bloco de notas (TXT) e posteriormente convertido em (WND - extensão própria do



programa). As informações horárias inseridas foram: mês (MO), dia (DY), hora (HR), velocidade do vento (SPD) (em  $\text{km.h}^{-1}$ ), sentido do vento (DIR) (em graus) e nebulosidade (CL) (em %).

As informações topográficas foram obtidas do banco de dados Topodata (INPE, 2011), da folha 25S51, que apresenta resolução espacial de 30 metros (FIGURA 23).

FIGURA 23 – CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFIAS DA ÁREA DE OCORRÊNCIA DO INCÊNDIO DE 4 DE SETEMBRO DE 2017 NO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA

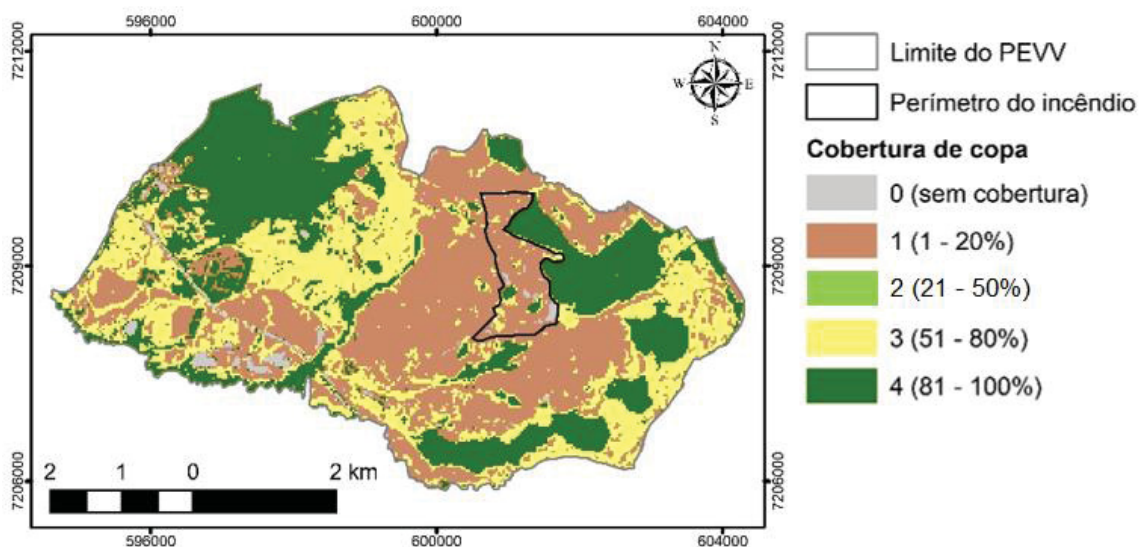


FONTE: INPE (2011), elaborado pela autora (2020).

A cobertura de copa e a determinação dos modelos de combustíveis foram embasados na classificação supervisionada (*Image classification*) de imagem do satélite Landsat 8 *Operational Land Imager* (OLI) de composição RGB 6-5-4, extraída do banco de dados *Earth Explorer*, da *United States Geological Survey*. Esse processo de classificação foi realizado com auxílio do zoneamento de uso e ocupação do solo presentes no plano de manejo do Parque Estadual de Vila Velha (IAP, 2004).

O *raster*, referente a cobertura de copa (FIGURA 24), foi elaborado por meio de dados categóricos pré-definidos: classe 0 (sem cobertura); 1 (1-20%); 2 (21-50%); 3 (51-80%); e 4 (81-100%).

FIGURA 24 – CLASSES DE COBERTURA DE COPA PARA O PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA



FONTE: A autora (2020).

As principais tipologias presentes na área de estudos delimitada para a simulação do incêndio florestal foram: estepe *stricto sensu*, capoeiras e floresta ombrófila mista (FIGURA 25).

FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO DAS TIPOLOGIAS UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO: CAMPO SECO (A); CAPOEIRA (B); E FLORESTA OMBRÓFILA MISTA (C)

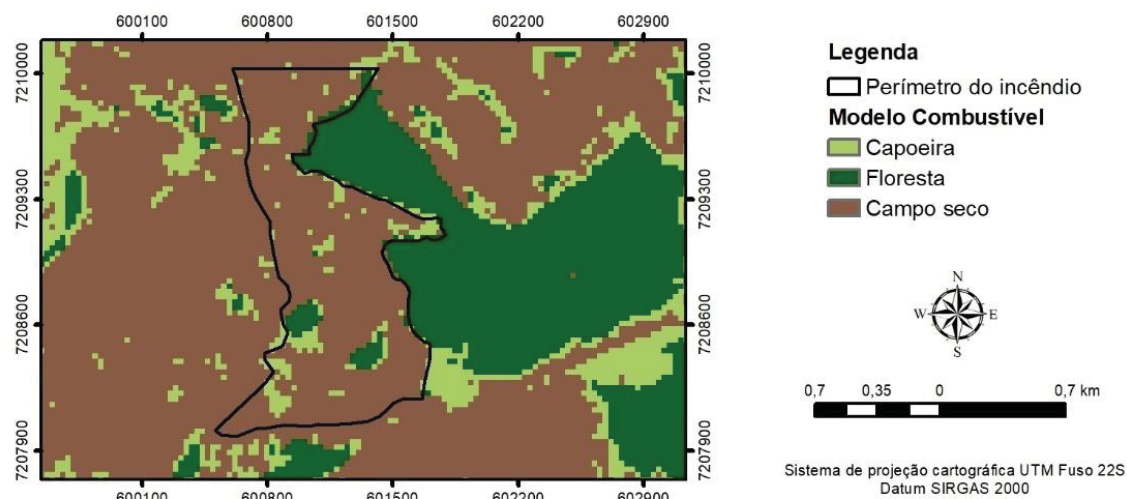


FONTE: (A) A autora (2020); (B e C) IAP (2004).

Segundo o IAP (2004), a FOM encontra-se em estágio sucessional intermediário, com dois estratos arbóreos e sub-bosque em condições deficitárias de regeneração, ainda assim a cobertura é densa, sendo escassas as clareiras e ausentes os processos de erosão. De acordo com Melo *et al.* (2006), a carga total de combustível nessa tipologia foi de  $11,5 \text{ Mg.ha}^{-1}$ . Para floresta clímax, Carapiá (2006) adotou o modelo 8 (FM8). Para áreas de

capoeira, Griebeler *et al.* (2020) observaram uma carga total de  $18,6 \text{ Mg.ha}^{-1}$ . A distribuição espacial dessas três tipologias está apresentada na Figura 26.

FIGURA 26 – ESPACIALIZAÇÃO DOS MODELOS COMBUSTÍVEIS PARA A ÁREA DE ESTUDO



FONTE: A autora (2020).

O apanhado de modelos de combustíveis adotados para a simulação do incêndio florestal de 4 de setembro de 2017 está apresentado na Tabela 7.

TABELA 7 – QUANTIDADE DE MATERIAL COMBUSTÍVEL POR CLASSE PARA OS MODELOS DE INTERESSE

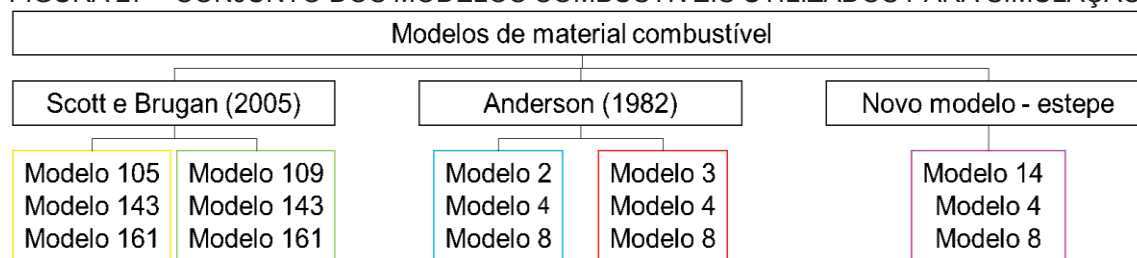
Fonte	Vegetação	Modelo	Quantidade de material combustível ( $\text{Mg.ha}^{-1}$ )				
			1h	10h	100 h	vivoH	vivoW
Anderson (1982)	<i>Timber (grass and understory)</i>	2 - FM2	4,9	2,5	1,2	1,2	-
	<i>Tall grass</i>	3 - FM3	6,7	0,0	0,0	0,0	-
	<i>Chaparral</i>	4 - FM4	12,4	9,9	4,9	0,0	-
	<i>Hardwood litter</i>	8 - FM8	1,5	1,0	2,5	0,0	-
Scott e Burgan (2005)	<i>Tall grass</i>	105 - GR5	1,0	0,0	0,0	6,2	0,0
	<i>Tall grass</i>	109 - GR9	2,5	2,5	0,0	22,2	0,0
	<i>Chaparral</i>	143 - SH3	1,11	7,4	0,0	0,0	15,3
	<i>Timber-understory</i>	161 - TU1	0,5	2,2	3,7	0,5	2,2
Seger (2016)	<i>Estepe stricto sensu</i>	MC14	7,0	0,09	0,0	1,2	0,63

FONTE: elaborado pela autora (2020).

NOTA: h – hora; VivoH – material herbáceo vivo; VivoW – material lenhoso vivo.

A partir desses modelos foram gerados cinco mapas de combustíveis para a região de estudo (FIGURA 27), a fim de selecionar os mais adequados para a simulação do incêndio florestal. Nesta etapa foram priorizados os modelos voltados a vegetação campestre, uma vez que o incêndio se propagou predominantemente sobre essa tipologia.

FIGURA 27 – CONJUNTO DOS MODELOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS PARA SIMULAÇÃO



FONTE: A autora (2020).

#### 4.4.3 Eficiência dos modelos ajustados

Primeiramente, os perímetros simulados foram comparados ao perímetro original do incêndio e avaliados por meio do cálculo de *Skill Score* e Porcentagem de Sucesso (SAMPAIO, 1999). Baseada na metodologia aplicada por Paixão (2014), essa etapa consistiu na conversão de formato *shapefile* para *raster*, no *software Arcgis 10.5*, de cada perímetro. Para área queimada real foi atribuído o valor 1 e para as áreas simuladas foi atribuído o valor 2, por meio da função *reclassify*. A conversão incluiu um retângulo ao redor dos perímetros, considerado como área não queimada e assim classificado com valor 0. Por meio da função *raster calculator*, cada perímetro simulado foi sobreposto ao perímetro real por meio da função: perímetro real + perímetro simulado; a qual resulta quatro possíveis valores:

- 0 – área não queimada, tanto real como simulada (d);
- 1 – área queimada real, mas não queimada simulada (c);
- 2 – área queimada simulada, mas não queimada real (b);
- 3 – área queimada, tanto real como simulada (a).

A quantificação desses resultados foi realizada pelo número de *pixels* obtidos em cada classe, que foram dispostos em uma tabela de contingência, que aborda valores observados (reais) e os previstos (simulados) para um evento, como apresentado nas Tabelas 8 e 9.

TABELA 8 – TABELA DE CONTINGÊNCIA

Evento		Real		Total simulado
		Queimado	Não queimado	
Simulado	Queimado	a	b	N2 = a + b
	Não queimado	c	d	N4 = c + d
Total real		N1 = a + c	N3 = b + d	N = a + b + c + d

FONTE: SAMPAIO (1999).

TABELA 9 – CÁLCULOS DA TABELA DE CONTINGÊNCIA

Evento		Observado		Total simulado
		Queimado	Não queimado	
Previsto	Queimado	a / (a + c)	b / (b + d)	1
	Não queimado	c / (a + c)	d / (b + d)	1
Total real		1	1	2

FONTE: SAMPAIO (1999).

As variáveis necessárias para o cálculo são:

N: número total de observações

$$N = a + b + c + d$$

G: número de acertos na previsão

$$G = a + d$$

H: número esperado de acertos

$$H = N \times (1 - p) \times (1 - q) + N \times p \times q$$

Em que:

$$p = N1 / N \text{ e } q = N2 / N$$

SS: *skill score*

$$SS = (G - H) / (N - H)$$

PS: porcentagem de sucesso

$$PS = G / N$$

Para cada parâmetro simulado foi realizado procedimento estatístico de diferença menos significativa (*Least Significant Difference*) (LSD) de Fisher de comparação de médias a nível de confiança de 95%, por meio do *software Statgraphics Centurion XVI*.

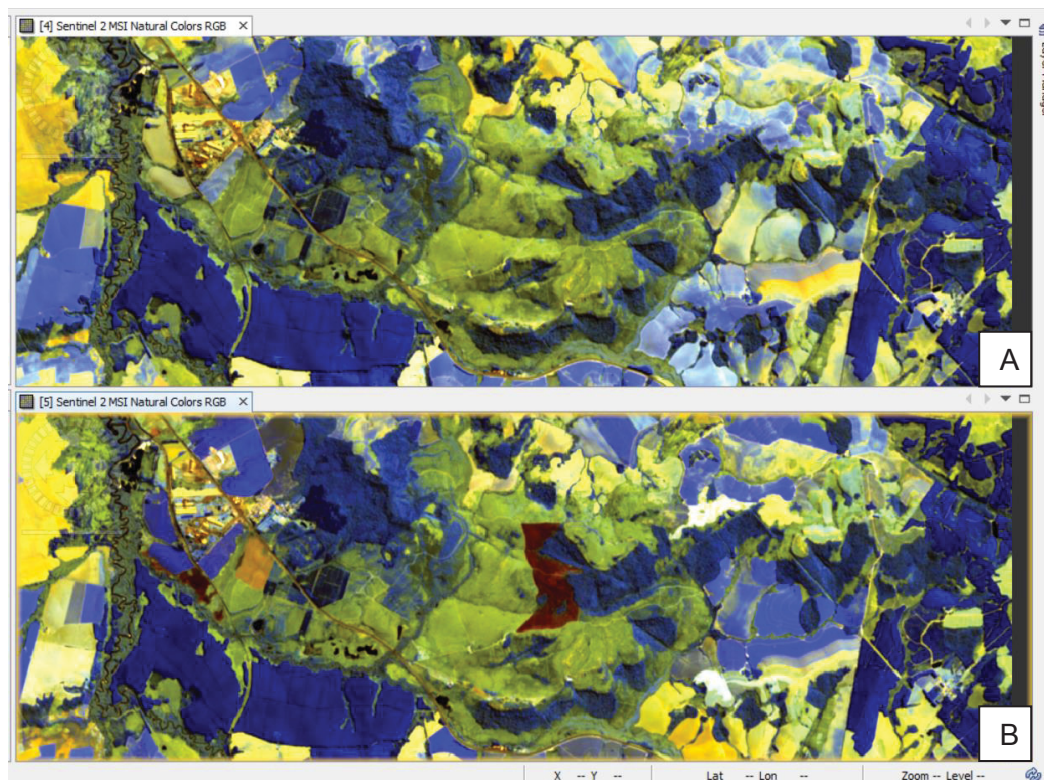
#### 4.5 SEVERIDADE DO INCÊNDIO FLORESTAL E REGENERAÇÃO DE BIOMASSA

A metodologia foi embasada em Rus-Copernicus (2017) e executada por meio do *software SNAP (Sentinels Application Platform)*. O incêndio florestal



ocorreu no dia 4 de setembro de 2017. Assim, para estimativa da severidade foram adquiridas imagens Sentinel (2A) (USGS, 2019), disponíveis para data anterior (27/07/2017) e posterior (05/09/2017) ao evento (FIGURA 28).

FIGURA 28 – IMAGENS SENTINEL PRÉ (A) E PÓS (B) INCÊNDIO PARA O PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA (R:12; G:11; B:8A)



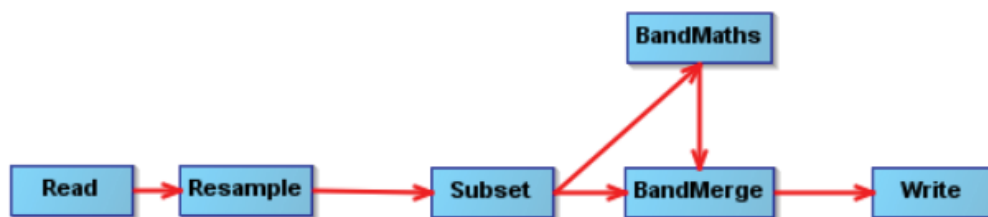
FONTE: USGS (2019); elaborado pela autora (2020).

Primeiramente foi realizada a correção atmosférica para ambas as imagens, utilizando a ferramenta Sen2Cor280, para então gerar a máscara referente a nuvens (*cloud\_mask*), segundo a expressão:

```
if (scl_cloud_medium_proba + scl_cloud_high_proba + scl_thin_cirrus) < 255
then 0 else 1 .
```

A próxima etapa foi o cálculo do NBR (*Normalized Burn Ratio*) para as duas imagens, que foi realizado em lote por meio da ferramenta *Batch Processing*. Previamente à execução, tanto o processo como as etapas foram definidas por meio do *GraphBuilder* (FIGURA 29).

FIGURA 29 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA ELABORADA EM *GRAPHBUILD* DE ETAPAS E PROCESSOS EXECUTADOS EM *BATCH PROCESSING*



FONTE: RUS-COPERNICUS (2017).

A etapa *Resample* visa amostrar as bandas para uma mesma resolução. Neste caso foi utilizado como referência a banda B2 (10 metros de resolução) pelo método bilinear. Em *Subset* foram selecionadas as bandas de interesse (B3, B8, B12 e *cloud\_mask*) e determinada a área de interesse na imagem (X: 9300 *Width*: 1200 ; Y: 8700, *Height*: 1000). Na etapa *BandMerge* foi realizada a união das bandas de interesse para o novo arquivo e, por último, em *BandMath*, na aba *edit expression*, foi realizado o cálculo de NBR, por meio da expressão:  $(B8 - B12)/(B8 + B12)$ .

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Em que:

*NBR* – *Normalized Burn Ratio*

*NIR* – Banda espectral 8 – infravermelho próximo;

*SWIR* – Banda espectral 12 – infravermelho de onda curta.

A próxima fase consistiu em mesclar os dois arquivos para efetuar o cálculo de alteração nos valores de NBR (pré e pós incêndio), por meio da ferramenta *Collocation*. Neste momento foi preciso realizar uma máscara considerando os corpos d'água, uma vez que eles podem apresentar valores semelhantes em algumas circunstâncias. A detecção de corpos d'água foi realizada pelo NDWI (*Normalized Difference Water Index*) (McFEETRS, 1996):  $(B3 - B8)/(B3 + B8)$ .



$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Em que:

*NDWI* – Normalized Difference Water Index;

*Green* – Banda espectral 3 – verde;

*NIR* – Banda espectral 8 – infravermelho próximo.

Juntamente com o cálculo de NDWI, a máscara de corpos d'água foi mesclada à máscara de nuvens (*cloud\_water\_mask*) por meio da expressão:

*if (cloud\_mask\_July > 0 or cloud\_mask\_September > 0 or ((B3\_July – B8\_September)/(B3\_July + B8\_September))>= 0.0) then 1 else 0.*

Segundo Parks *et al.* (2014), *Delta Normalized Burn Ratio* (dNBR) é frequentemente utilizada para estimar severidade de incêndios. No entanto, os autores descrevem que a baixa cobertura de vegetação pode ser um empecilho, pois geralmente resulta em baixos valores de dNBR, independente do grau de queima, logo não quantifica alta severidade mesmo se toda essa vegetação pré incêndio for consumida. Tendo isso em vista, os autores propuseram um outro índice, *Relatizived Burn Ratio* (RBR):

$$RBR = \frac{NBR_{préfogo} - NBR_{pósfogo}}{NBR_{préfogo} + 1.001}$$

Em que:

*RBR* – Relatizived Burn Ratio






*NBR* – Normalized Burn Ratio

Para esta etapa foi criada uma nova banda (*band maths*) denominada RBR, por meio da expressão:

*if cloud\_water\_mask == 0 then ((NBR\_July –NBR\_September)/(NBR\_July + 1.001)) else NaN .*

Por não haver uma classificação específica para RBR, a categorização seguiu a proposta de Key e Benson (2006) para dNBR, como utilizado por RUS-COPERNICUS; 2017, que está representada na Tabela 10.

TABELA 10 – CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE SEVERIDADE PARA dNBR

Nível de severidade		Intervalos de dNBR
	Não queimado	-0,100 - +0,099
	Baixa severidade	+0,100 - +0,269
	Moderada - Baixa severidade	+0,270 - +0,439
	Moderada - Alta severidade	+0,440 - +0,659
	Alta severidade	+0,660 - +1,300

FONTE: KEY; BENSON (2006).

Esta classificação foi comparada à descrição visual de severidade de Keeley (2009) e Botella-Martínez e Fernández-Manso (2017), em que:

- Não queimada: partes da planta verdes e inalteradas, sem efeito direto do calor;
- Severidade baixa: no caso de árvores, copas inalteradas em sua maior parte (permanecem verdes em sua totalidade). O dossel arbustivo apresenta sinais de chamuscado, porém as manchas de queima não são predominantes;
- Severidade moderada-baixa: mais da metade da área coberta pelas copas das árvores estão chamuscadas, porém se conservam as folhas com predominância da cor marrom. Os arbustos aparecem queimados em sua maior parte, mas a cinza que se observa é predominantemente da cor preta.
- Severidade moderada-alta: nas árvores as copas estão completamente consumidas em mais de 50% da área coberta, sem que caíam as folhas nem elementos finos, com predominância da cor preta. Os arbustos estão completamente carbonizados, somente com os elementos mais grossos. A cinza é predominantemente em tons cinzas e esbranquiçados.
- Severidade alta: árvores mortas e consumo total da serapilheira. Deposição de cinzas brancas e matéria orgânica carbonizada a vários centímetros de profundidade.

#### 4.5.1 Análise da resposta da vegetação após o incêndio florestal

O período de análise decorreu de abril de 2016 a dezembro de 2019. Foram obtidas imagens *Sentinel* (2A e 2B) - T22JET (USGS, 2019). A relação de imagens obtidas está apresentada na Tabela 11.

TABELA 11 – IMAGENS SENTINEL OBTIDAS NO PERÍODO DE 2016 A 2019

Ano	Mês	Dia	Sentinel
2016	Abril	3	S2A
	Julho	12	S2A
	Setembro	17	S2A
	Dezembro	6	S2A
2017	Janeiro	15	S2A
	Março	9	S2A
	Maio	15	S2A
	Julho	27	S2A
	Setembro	5	S2A
	Dezembro	14	S2A
2018	Janeiro	5	S2B
	Março	11	S2A
	Abril	18	S2B
	Maio	10	S2B
	Julho	27	S2B
	Setembro	10	S2A
	Dezembro	21	S2B
2019	Janeiro	30	S2B
	Abril	18	S2A
	Maio	5	S2A
	Julho	17	S2A
	Setembro	17	S2B
	Dezembro	29	S2B

FONTE: A autora (2020).

O índice espectral utilizado foi o NBR, por meio da expressão:  $(B8 - B12)/(B12 + B8)$ , e utilização do programa SNAP.

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Em que:

*NBR* – Normalized Burn Ratio

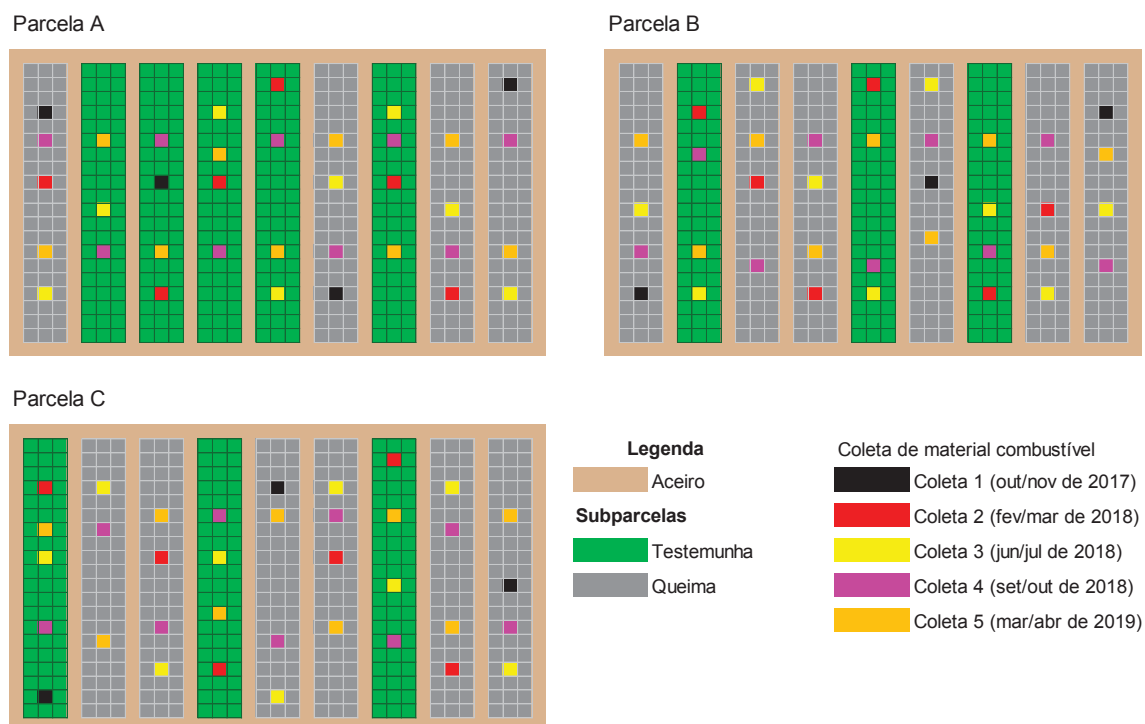
*NIR* – Banda espectral 8 – infravermelho próximo;

*SWIR* – Banda espectral 12 – infravermelho de onda curta.

Foram considerados os valores de NBR máximos, médios e mínimos, processados pelo *software Excel*.

A caracterização do material combustível foi realizada conforme a metodologia já descrita no item 4.3.2 (acompanhamento de material combustível fino). Adicionalmente às subparcelas já estabelecidas, foram alocadas subparcelas em áreas correspondentes ao incêndio florestal (FIGURA 30).

FIGURA 30 - CROQUI DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO APÓS INCÊNDIO



FONTE: A autora (2020).

A suficiência de amostragem foi realizada por meio do método sequencial de Stein, segundo o exposto por Seger (2015), conforme anteriormente apresentada.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 HISTÓRICO DE OCORRÊNCIA DE FOGO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA

Do período de janeiro de 1997 a dezembro de 2018 resultaram 792 imagens do satélite Landsat que foram analisadas. Dessas, 31,2% estavam aptas para a demarcação das cicatrizes resultantes da ação do fogo, enquanto 68,8% foram descartadas, devido a cobertura de nuvens (98,2%) ou deslocamento das imagens (1,8%), o que impossibilitou a análise do ano de 1998.

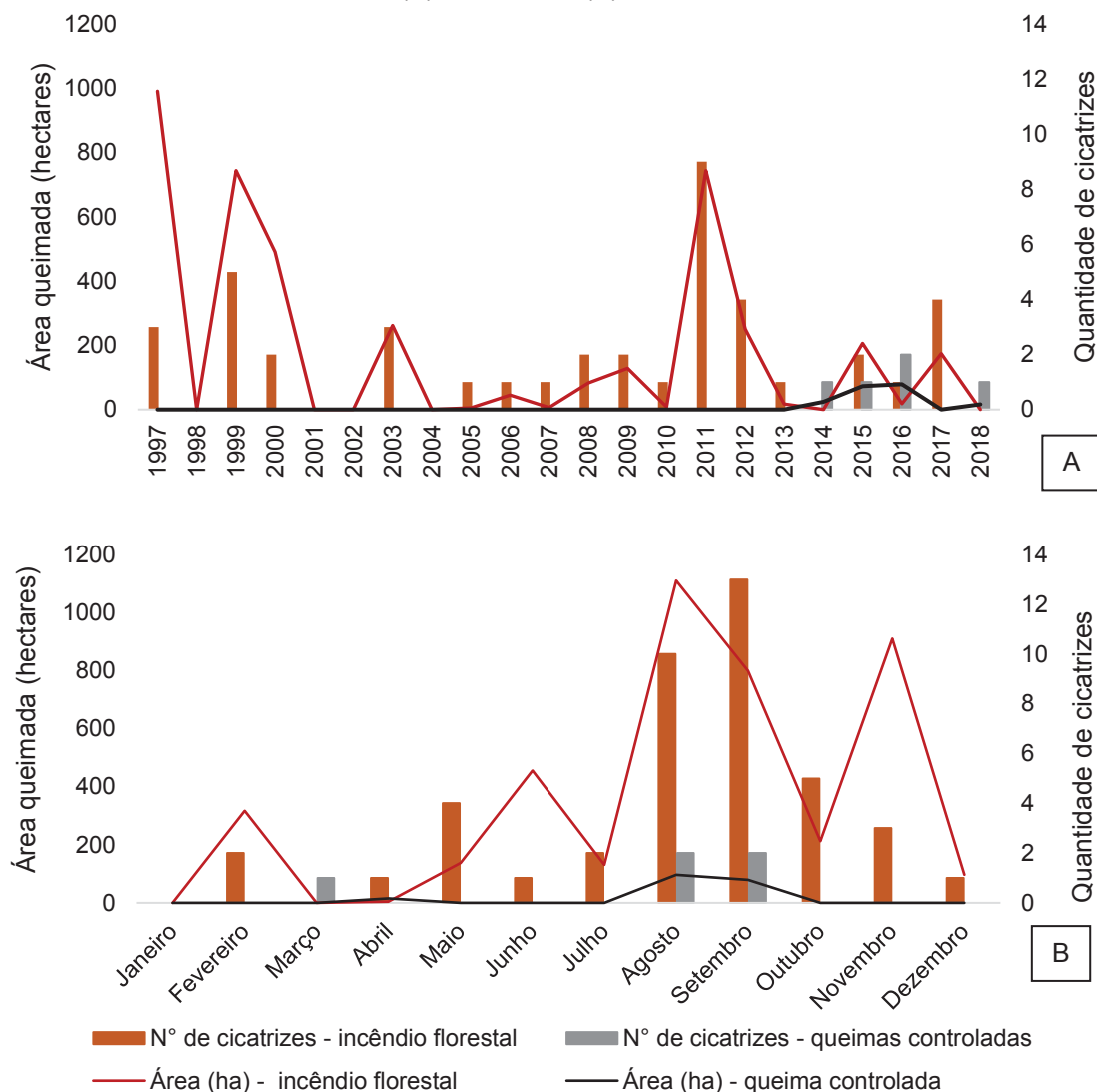
No período de 22 anos não foi constatado ocorrência de fogo nos anos de 2001, 2002 e 2004. Para os demais anos foram observadas 47 cicatrizes; destas 89,4% foram referentes a incêndios florestais, enquanto as demais foram provenientes de queimas controladas.

A prática de manejo do fogo para restauração de áreas campestres no Parque Estadual de Vila Velha teve início em 2014 (IAP, 2018), aliada a projetos de pesquisas que visavam a restauração dos ecossistemas de campos, como o desenvolvido por Maranh (2014), que determinou uma área de aproximadamente 1.386,1 ha (42,39% da área total) a ser manejada.

A execução das queimas controladas ocorreu nos meses de abril, agosto e setembro. Segundo Gorgone-Barbosa *et al.* (2015), a estação de ocorrência de fogo influencia principalmente a sua intensidade. Neste sentido, Seger (2015) evidenciou diferença estatística significativa para os parâmetros de intensidade e calor liberado, para os períodos pré e pós-inverno, em campos na região sul do Brasil em queimas a favor do vento.

A quantidade de cicatrizes e área queimada (incêndio e queima controlada), representadas anual e mensalmente, está representada na Figura 31.

FIGURA 31 – QUANTIDADE DE CICATRIZES E ÁREA QUEIMADA, DE INCÊNDIOS FLORESTAIS E DE QUEIMA CONTROLADA, PARA O PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA NO PERÍODO DE 1997 A 2018, REPRESENTADO DE FORMA ANUAL (A) E MENSAL (B)



FONTE: A autora (2020).

No período de 22 anos, a área média das cicatrizes de incêndios florestais foi de 99,4 ha, enquanto para o período de 2014 a 2018, a área média das cicatrizes de queimas controladas foi de 32,8 ha, variando de 9,5 a 72,6 ha.

O ano de 2011 destacou-se por concentrar 19,1% das cicatrizes, totalizando 744,1 ha de área queimada, sendo atos criminosos a provável causa (RODRIGUES *et al.*, 2017). A cicatriz de maior área (907,3 ha) e perímetro (27,8 km) foi observada em agosto de 1997, o que contribuiu para esse mês totalizar a maior área queimada (1.206,8 ha), com 25,5% das ocorrências, enquanto para

setembro foram observadas 31,9% das cicatrizes (878,5 ha). Outro evento de destaque ocorreu em novembro de 1999, que atingiu uma área de 686,1 ha, sendo o mês de novembro o segundo em representatividade de área queimada, com 910,7 ha.

Conforme Torres *et al.* (2016), o período crítico de ocorrência de incêndios florestais nas unidades de conservação brasileiras estende-se de julho a novembro, concentrando os picos de área queimada nos meses de agosto e setembro, corroborando com o observado no presente estudo. Segundo Accatino e Michele (2013), os incêndios comumente ocorrem ao final da estação seca nas regiões de savanas úmidas, favorecidos pelo acúmulo de material vegetal morto, sendo que a probabilidade de ignição e propagação dependem da densidade e da continuidade do estrato herbáceo, condição essa que está intimamente ligada a quantidade de chuva da estação chuvosa.

A quantidade de cicatrizes de incêndios florestais e a sua representatividade (%) por classes de tamanho, está apresentada na Tabela 12.

TABELA 12 – QUANTIDADE DE CICATRIZES DE INCÊNDIOS E SUA REPRESENTATIVIDADE (%) POR CLASSES DE TAMANHO, PARA O PERÍODO DE 1997 A 2018, PARA O PEVV

Cicatrizes de incêndios florestais						
Ano	Classes de tamanho (intervalos em hectares)				TOTAL	%
	II	III	IV	V		
	(1,0 a 4,0)	(4,1 a 40,0)	(40,1 a 200,0)	(> 200,0)		
1997		1	1	1	3	7,1
1998	-	-	-	-	-	-
1999	1	3		1	5	11,9
2000		1		1	2	4,8
2001	-	-	-	-	-	-
2002	-	-	-	-	-	-
2003		1	2		3	7,1
2004	-	-	-	-	-	-
2005		1			1	2,4
2006			1		1	2,4
2007		1			1	2,4
2008		1	1		2	4,8
2009		1	1		2	4,8
2010		1			1	2,4
2011		3	5	1	9	21,4
2012		3		1	4	9,5
2013		1			1	2,4
2015			2		2	4,8
2016		1			1	2,4
2017	2		2		4	9,5
2018	-	-	-	-	-	-
TOTAL	3	19	15	5	42	100,0
%	7,1	45,2	35,7	12,0	100,0	-

FONTE: A autora (2020).

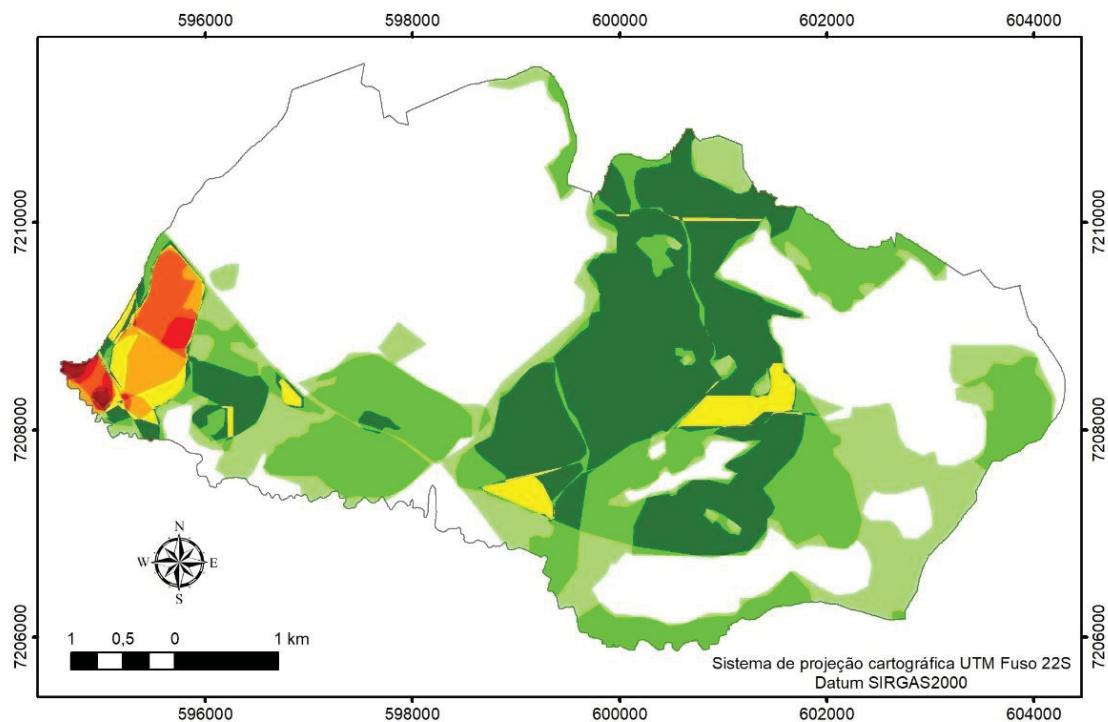


Segundo a classificação das cicatrizes de incêndios por classe de tamanho, observou-se para o período de 22 anos que 7,1% enquadra-se na classe II; 45,2% na classe III; 35,7% na classe IV; e 12,0% na classe V. Não foram observadas cicatrizes correspondentes a classe I ( $\leq 0,09$  ha), entretanto esse fato está relacionado a resolução das imagens de satélite (30 metros), o que dificulta a determinação de cicatrizes de incêndios dessa categoria. Por outro lado, Rodrigues *et al.* (2017), ao analisarem o Registro de Ocorrência de Incêndios (ROI) do Parque (2009 a 2013), também não evidenciaram incêndios nessa classe. Cabe destacar que após a publicação do plano de manejo do parque, em 2004, foi observada uma redução de incêndios na classe V.

Segundo Lima *et al.* (2018), o tamanho de área queimada apresenta correlação significativa com o tempo de duração do combate e também com o tempo de ataque, este por sua vez pode estar relacionado a distância a se percorrer até o local do fogo, a um sistema de mobilização pouco eficiente ou ao difícil acesso aos locais de fogo. Neste contexto, Tetto, Batista e Soares (2012) descrevem que a concentração de incêndios nas classes I e II é indicativo de um sistema de combate eficiente (detecção, mobilização, deslocamento e combate), fato não observado para o parque.

Na reconstrução de histórico de fogo, em termos de frequência de fogo (FIGURA 32), pode-se observar que 56% da área de estudo (1.830,8 ha) foram queimados pelo menos uma vez, dos quais 74% correspondem a formação de estepe *stricto sensu*. A vegetação sem fogo corresponde predominantemente a floresta ombrófila mista (48%), ecossistema influenciado pelo fogo.

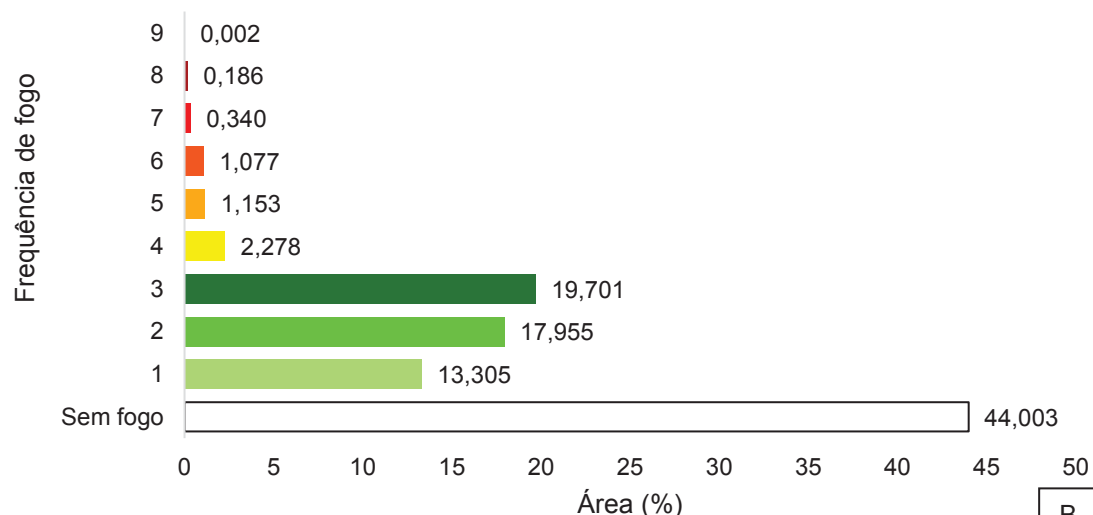
FIGURA 32 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE FOGO (A) E ÁREA QUEIMADA (%) POR FREQUÊNCIA DE FOGO (B), PARA O PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA NO PERÍODO DE 1997 A 2018



#### Legenda

Frequência de fogo 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

A



B

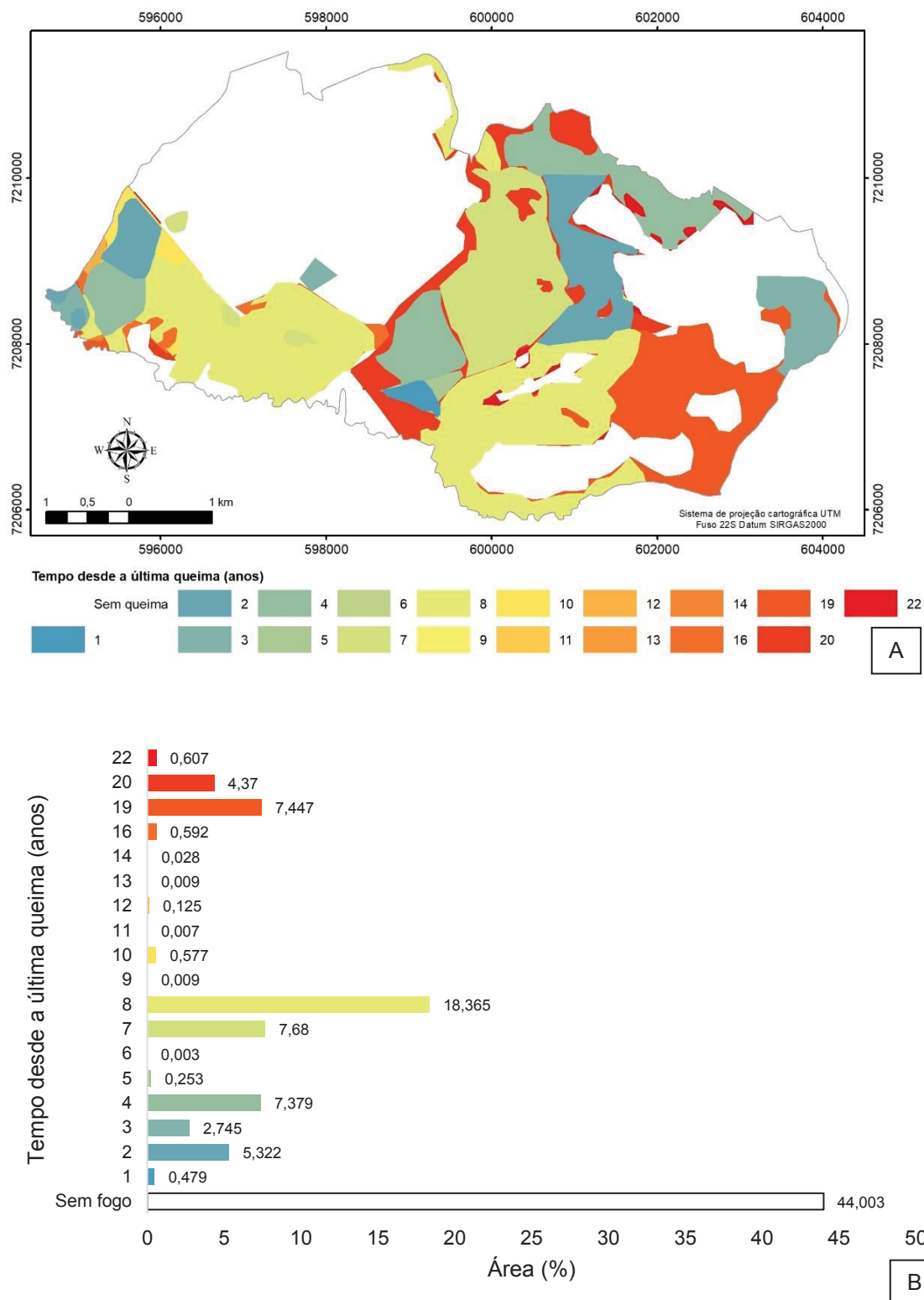
FONTE: A autora (2020).

Observou-se que aproximadamente 51% da área do parque queimou de uma a três vezes, 4,51% de quatro a seis vezes e 0,53% de sete a nove vezes, sendo a região sudoeste a mais frequentemente atingida pelo fogo, enquanto na porção leste foi identificada uma menor frequência. Para o Parque Nacional Serra do Cipó, Alvarado *et al.* (2017) também observaram uma predominância de baixa e moderada frequência. Segundo os autores, isso configura um mosaico de áreas queimadas, diferindo em frequência, intensidade e sazonalidade.

Silva *et al.* (2011) sugerem que algumas áreas tenham baixas frequências de fogo visando a conservação de espécies mais sensíveis, entremeadas por outras com maior frequência e menores tempos desde a última queima, a fim de evitar extensas áreas com acúmulo de biomassa. Neste contexto, Silva (2018) recomenda também distintos tempos de retorno, além do combate ao fogo não programado em intervalos inferiores a quatro anos, visando conservar a estrutura da vegetação arbustiva e arbórea e viabilizar a presença de espécies exclusivas de cada regime de fogo, o que pode proporcionar refúgios para a fauna em casos de incêndios florestais.

Observou-se, na região leste do Parque Estadual de Vila Velha, áreas com tempos mais prolongados sem fogo (19 anos), as quais recomenda-se serem priorizadas nas próximas etapas de manejo de fogo (FIGURA 33).

FIGURA 33 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE TEMPO DESDE A ÚLTIMA QUEIMA (A) E ÁREA QUEIMADA (%) POR TEMPO DESDE A ÚLTIMA QUEIMA (B), PARA O PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA NO PERÍODO DE 1997 A 2018

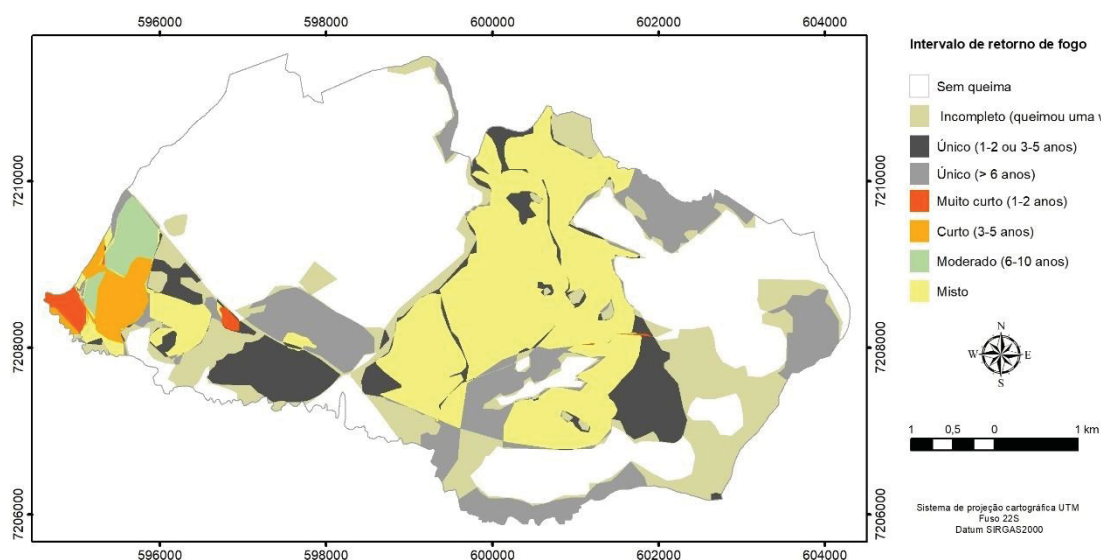


FONTE: A autora (2020).

Temporalmente, 16,18% da área do parque queimou nos últimos 5 anos, 26,63% queimaram pela última vez de 6 a 10 anos e 13,19% superaram 10 anos sem fogo. O tempo após a ocorrência de fogo é considerado por Batista *et al.* (2018) um fator importante na estimativa não só do acúmulo de biomassa (principalmente gramíneas), mas também da proporção entre material seco e úmido e sua conectividade. Neste sentido, Alves *et al.* (2018) observaram uma maior quantidade de biomassa seca em áreas com maior tempo sem ocorrência de fogo, o que, segundo os autores, torna essas áreas mais propícias à ignição e propagação do fogo.

O mapa de intervalo de retorno de fogo do Parque Estadual de Vila Velha está apresentado na Figura 34.

FIGURA 34 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE INTERVALO DE RETORNO DE FOGO PARA O PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA NO PERÍODO DE 1997 A 2018



FONTE: Elaborado pela autora (2020).

O intervalo de retorno de fogo misto foi predominante, com 21,1% da área do parque, seguido de intervalo incompleto (13,3%) - áreas que queimaram apenas uma vez. Demais intervalos: único moderado-longo (10,9%), único curto-muito curto (7,1%), curto (1,7%), moderado (1,3%) e muito curto (0,6%). O domínio do tempo de retorno muito curto foi observado para o Parque Nacional Serra do Cipó (ALVARADO *et al.*, 2017) e para áreas de savana do Parque Estadual do Jalapão (PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2014). Segundo os mesmos

autores, comumente o tempo de retorno para savanas tropicais variam de três anos, para áreas de savana aberta, a seis anos para formações florestais densas.

Conforme Knapp, Estes e Skinner (2009), alterações substanciais na composição da comunidade normalmente exigem vários ciclos de queima prescrita, quando aplicado repetidamente na mesma época do ano pode ser prejudicial, uma vez que a resposta à estação de queima difere entre as espécies. Neste contexto, Rodrigues (2019) observou alterações nos padrões de comunidade em campo sujo após cinco queimas consecutivas (anual e bianual), promovendo um declínio na cobertura de gramíneas, enquanto havia um aumento no recrutamento de novas espécies. Desta maneira, Knapp, Estes e Skinner (2009) sugerem que um regime heterogêneo de fogo maximize a biodiversidade.

## 5.2 QUEIMAS CONTROLADAS

### 5.2.1 Condições meteorológicas

Segundo Torres, Silva Junior e Lima (2019), dos principais fatores que atuam sobre o comportamento do fogo – meteorologia, combustível e topografia – as variáveis meteorológicas são consideradas as mais dinâmicas. Os valores médios das condições meteorológicas dos dias em que foram realizados os experimentos, assim como dos dias antecedentes, estão apresentados na Tabela 13.

TABELA 13 – MÉDIA DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS DIÁRIAS PARA PONTA GROSSA

Data	Umidade relativa do ar (%)	Temperatura do ar (°C)	Velocidade do vento (km.h <sup>-1</sup> )
30/08/2017	64,2	20,2	4,8
31/08/2017	81,0	16,0	18,0
01/09/2017	77,8	15,3	17,0
02/09/2017	80,0	14,8	17,0
03/09/2017	75,6	17,4	9,8
04/09/2017	63,7	18,4	8,0

FONTE: SIMEPAR (2017).

Observa-se que as condições meteorológicas se enquadram nas premissas pré-estabelecidas para a execução dos experimentos. Os dados meteorológicos foram obtidos por meio da estação SIMEPAR, enquanto a



velocidade de vento foi obtida em campo no momento inicial e final de cada queima (TABELA 14).

TABELA 14 – VALORES METEOROLÓGICOS REFERENTES AO INÍCIO E FINAL DE CADA QUEIMA

Data	Subparcela	Horário de queima	Condições meteorológicas		
			Umidade Relativa do ar (%) <sup>*</sup>	Temperatura do ar (°C) <sup>*</sup>	Velocidade do vento (km.h <sup>-1</sup> )
31 de agosto de 2017	B9	Inicial: 10:40	79,0	17,9	12,6
		Final: 11:07	77,1	18,2	9,4
	B8	Inicial: 11:37	75,1	18,7	7,2
		Final: 12:00	75,3	18,4	5,4
	B6	Inicial: 12:23	73,6	18,7	7,6
		Final: 12:45	73,4	18,6	10,8
	B4	Inicial: 12:50	73,3	18,5	10,8
		Final: 13:10	72,4	18,5	5,4
	B3	Inicial: 13:18	72,4	18,6	7,2
		Final: 13:35	72,8	18,7	10,8
	B1	Inicial: 13:46	71,6	18,8	6,5
		Final: 14:05	71,6	18,8	2,9
	C9	Inicial: 15:19	73,9	17,6	2,2
		Final: 15:30	76,4	17,4	3,6
	C8	Inicial: 15:30	76,4	17,4	7,2
		Final: 16:05	79,0	16,5	3,6
	C6	Inicial: 15:38	77,2	17,1	4,0
		Final: 16:09	78,5	16,4	6,5
	C5	Inicial: 16:14	78,7	16,3	3,6
		Final: 16:47	79,1	16,2	4,0
	C3	Inicial: 16:22	78,0	16,3	2,9
		Final: 16:52	79,0	16,0	3,6
	C2	Inicial: 16:52	79,0	16,0	4,0
		Final: 17:25	78,9	15,7	3,6
	A1	Inicial: 17:37	78,9	15,6	1,8
		Final: 18:10	79,6	15,2	4,0
	A9	Inicial: 18:13	79,6	15,2	1,4
		Final: 18:44	80,1	15,0	4,7
	<b>Média</b>		<b>76,4</b>	<b>17,2</b>	<b>5,6</b>
4 de setembro de 2017	A8	Inicial: 10:26	52,2	22,0	5,4
		Final: 10:49	51,6	22,3	10,8
	A6	Inicial: 10:53	51,6	22,3	9,7
		Final: 11:11	48,6	23,0	10,8
	<b>Média</b>		<b>51,0</b>	<b>22,4</b>	<b>9,2</b>

FONTE: SIMEPAR (2017)\*, elaborado pela autora (2020).

A umidade relativa média do ar no primeiro dia de queima foi de 76,4%, com máxima de 80,1%, registrada às 18h44, e mínima de 71,6%, às 13h46, enquanto para o segundo dia a UR média durante as queimas foi de 51,0%. Essa variável apresenta comportamento diário inverso à temperatura do ar (SOARES;

BATISTA; TETTO, 2015), para qual foram registradas médias de 17,2 e 22,4 °C para o primeiro e o segundo dia de queima, respectivamente.

Em estudos nacionais de comportamento de fogo foram observados valores médios distintos para essas variáveis, no momento de execução das queimas. Para umidade relativa do ar foram constatados valores desde 16,9% (GANASSOLI NETO, 2019) até 95,8% (SCHIMIDT *et al.*, 2017), porém Seger *et al.* (2013) consideraram a faixa de umidade relativa de 30 a 70% como ótima. Por sua vez, a temperatura média do ar oscilou de 19,8 (SEGER *et al.*, 2013) a 39,3°C (SCHIMIDT *et al.*, 2017), para o qual Seger *et al.* (2013) apontaram o intervalo ótimo de 8 a 20 °C.

A velocidade do vento é um dos fatores que exerce maior influência na propagação do fogo (NUNES; SOARES; BATISTA, 2006), sendo o menos previsível. Para o primeiro dia de queima houve uma variação de 1,4 a 12,6 km.h<sup>-1</sup>, sendo a média de velocidade 5,6 km.h<sup>-1</sup>. O segundo dia oscilou de 5,4 a 10,8, com média de 9,2 km.h<sup>-1</sup>. Segundo Seger *et al.* (2013), o máximo aceitável para velocidade do vento é de 20 km.h<sup>-1</sup>.

Ao comparar as médias das variáveis meteorológicas por parcela (A, B e C), somente a temperatura do ar não indicou diferença estatística significativa (TABELA 15).

TABELA 15 – MÉDIA DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS POR PARCELA

Parcela	N	Variáveis meteorológicas		
		T (°C)*	UR (%)*	Veloc. vento (km.h <sup>-1</sup> )
A	4	18,8 <sub>a</sub>	65,3 <sub>a</sub>	6,08 <sub>ab</sub>
B	6	18,5 <sub>a</sub>	74,0 <sub>ab</sub>	8,05 <sub>b</sub>
C	6	16,2 <sub>a</sub>	78,3 <sub>b</sub>	4,07 <sub>a</sub>

FONTE: SIMEPAR (2017)\*, elaborado pela autora (2020).

Descrito como fator limitante para ocorrência de fogo, a precipitação facilmente altera o conteúdo de umidade da vegetação e do solo. Age de forma imediata sobre a umidade relativa e o conteúdo de umidade de combustíveis mortos e, dias depois, os combustíveis vivos incorporam a água do solo aos tecidos (MÉRIDA, 2009). O experimento foi realizado de 10 a 14 dias após as últimas chuvas que ocorreram nos dias 20 (~40 mm), 21 (~10 mm) de agosto (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA), 2017).

A oscilação das variáveis meteorológicas dentro de um mesmo experimento é evidenciada por outros autores, que apontam a questão como uma das principais dificuldades em se realizar experimentos em ambientes abertos (BATISTA; BEUTLING; PEREIRA, 2013; SEGER *et al.*, 2013; GANASSOLI NETO, 2019).

### 5.2.2 Material combustível

A caracterização do material combustível no momento do experimento está descrita na Tabela 16 e no Apêndice 1.

TABELA 16 – VALORES MÍNIMOS, MÉDIOS E MÁXIMOS DAS CARACTERÍSTICAS E CONSUMO DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO POR ÁREA EXPERIMENTAL

Caracterização do material combustível	Parcela	Mínimo	Média	Máximo
Carga total - úmida (Mg.ha <sup>-1</sup> )	A	9,6	15,4	35,2
	B	3,7	9,5	18,4
	C	3,0	9,2	15,5
Carga total – seco em estufa (Mg.ha <sup>-1</sup> )	A	5,8	10,6	15,2
	B	2,6	7,0	12,9
	C	2,0	7,2	13,5
Teor de umidade (%)	A	22,8	45,2	70,3
	B	17,1	35,8	64,2
	C	14,4	29,0	47,5
Combustível consumido (Mg.ha <sup>-1</sup> )	A	5,9	11,7	34,4
	B	0,9	6,3	13,1
	C	0,4	7,3	14,6
Combustível consumido (%)	A	37,7	75,0	97,7
	B	23,1	63,2	93,3
	C	43,6	78,6	94,2

FONTE: A autora (2020).

Não foi constatado a informação sobre a altura do estrato herbáceo em pesquisas de material combustível da estepe *stricto sensu*, entretanto observou-se que esta não ultrapassou 1 metro, sendo de aproximadamente 0,60 m, superior ao valor de aproximadamente 0,32 m descrito por Moreira (2019), para área de campo sujo de cerrado, sem fogo há 4 anos. Sugere-se inserir esta informação em caracterizações de material combustível, pois além de ser de fácil obtenção, é uma variável utilizada na elaboração de modelos em simuladores como o FlamMap, contribuindo assim na construção de modelos próprios para as tipologias nacionais.

A carga média de material combustível herbáceo ( $\sim 8,0 \text{ Mg.ha}^{-1}$ ) (seco em estufa) observada para estepe do PEVV foi inferior à caracterizada por Santos (2020), Seger (2016), Rodrigues (2018) e também por Fidelis *et al.* (2010), para campos sulinos com seis anos sem a passagem de fogo ( $\sim 10 \text{ Mg.ha}^{-1}$ ).

O teor de umidade médio do material combustível herbáceo (vivo e morto) para as coletas realizadas dia 31 de agosto foi de 34%, enquanto para o dia 4 de setembro foi de 47,1%, inferiores ao observado por Seger (2016) e Rodrigues (2018), contudo próximo ao observado por Fidelis *et al.* (2010), de 37,8 a 44,5%. Seger *et al.* (2013) realizaram experimento na mesma tipologia com combustível a 50% de teor médio de umidade pós-inverno, com variação de 38 a 61%.

Para áreas de campo sujo no cerrado (Jalapão), com tempo sem queima superior a quatro anos, Moreira (2019) indicou carga de material herbáceo total de 2,09 a 3,02  $\text{Mg.ha}^{-1}$ , sendo o teor de umidade do material herbáceo morto e vivo de 11,1 e 66,4%, respectivamente. Em áreas de campo úmido na mesma localidade, Schmidt *et al.* (2017) observaram carga total de material herbáceo de 5,51 a 8,11  $\text{Mg.ha}^{-1}$  (cinco anos sem ocorrência de fogo).

O material consumido na estepe do PEVV foi de aproximadamente 72,3%, indo de encontro com o observado por Seger *et al.* (2013) (77%) e Ganassoli Neto (2019) (71%). Estudos para o Cerrado indicaram valores superiores a 80% de material consumido (PIVELLO *et al.*, 2010; SCHMIDT *et al.*, 2017; SILVA, 2018). Silva (2018) observou, tanto para áreas campestres como para savanas, uma correlação positiva entre a carga de material consumido fino e o calor liberado por unidade de área, o que foi de encontro com o observado para área de estepe ( $r = 0,9$ ).

### 5.2.3 Comportamento do fogo

A descrição detalhada dos parâmetros do comportamento do fogo para as subparcelas de queimas executadas no Parque Estadual de Vila Velha está apresentada na Tabela 17 e suas correlações estão disponibilizadas no Apêndice 2. Foram observadas diferenças estatísticas significativas entre as

áreas para as variáveis: teor de umidade do material combustível, poder calorífico e calor liberado.

TABELA 17 – MÉDIAS DAS CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL COMBUSTÍVEL E DOS PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO DO FOGO POR SUBPARCELA DE QUEIMA

Parcela	Sub parcela	Material combustível		Comportamento do fogo				
		Teor de umidade (%)	Disponível (Mg.ha <sup>-1</sup> )	Velocidade de propagação (m.s <sup>-1</sup> )	Altura de chama (m)	Poder calorífico corrigido (kcal.kg <sup>-1</sup> )	Intensidade (kcal.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	Calor liberado (kcal.m <sup>-2</sup> )
A	1	39,23	17,2	0,0169	1,11	2627,3	76,2	4514,5
	6	34,83	8,3	0,0204	0,81	2730,9	45,9	2255,5
	8	59,41	10,5	0,0148	0,83	2224,6	34,6	2339,9
	9	47,50	11,0	0,0108	1,12	2448,8	29,0	2683,5
	Média	45,24 <sub>b</sub>	11,7	0,0157 <sub>a</sub>	0,97 <sub>a</sub>	2507,88 <sub>a</sub>	46,43 <sub>a</sub>	2948,33 <sub>b</sub>
B	1	35,44	4,2	0,0181	0,88	2716,1	22,4	1235,1
	3	29,81	5,0	0,0201	0,98	2858,0	28,5	1419,5
	4	29,20	8,3	0,0194	0,89	2874,1	46,1	2378,3
	6	36,65	3,2	0,0169	0,73	2687,3	16,6	984,2
	8	35,42	11,3	0,0161	0,74	2716,6	49,6	3076,5
	9	48,28	5,8	0,0128	1,01	2433,0	18,1	1417,2
	Média	35,80 <sub>ab</sub>	6,3	0,0172 <sub>a</sub>	0,87 <sub>a</sub>	2714,2 <sub>ab</sub>	30,22 <sub>a</sub>	1751,81 <sub>a</sub>
C	2	36,83	6,7	0,0110	1,19	2682,9	19,7	1799,8
	3	37,91	5,2	0,0110	0,98	2657,7	15,1	1368,7
	5	24,27	8,7	0,0114	1,24	3010,1	29,8	2618,8
	6	26,68	9,3	0,0111	1,16	2942,2	30,2	2714,2
	8	24,22	8,3	0,0103	0,76	3011,5	25,7	2499,6
	9	24,01	5,4	0,0346	1,6	3017,6	64,4	1859,6
	Média	28,99 <sub>a</sub>	7,3	0,0149 <sub>a</sub>	1,16 <sub>a</sub>	2887,02 <sub>b</sub>	30,82 <sub>a</sub>	2143,4 <sub>ab</sub>
Média geral		35,61	8,0	0,0160	1,00	2727,41	34,49	2197,81

FONTE: A autora (2020).

A média das velocidades de propagação do fogo foi de 0,0160 m.s<sup>-1</sup>, similar à máxima observada por Seger *et al.* (2013) (0,017 m.s<sup>-1</sup>), para quem a média foi de 0,012 m.s<sup>-1</sup>, com técnica de fogo contra o vento. Em estudos utilizando a queima a favor do vento, foram observadas correlações entre velocidade de propagação do fogo e a velocidade de vento (SILVA, 2018).

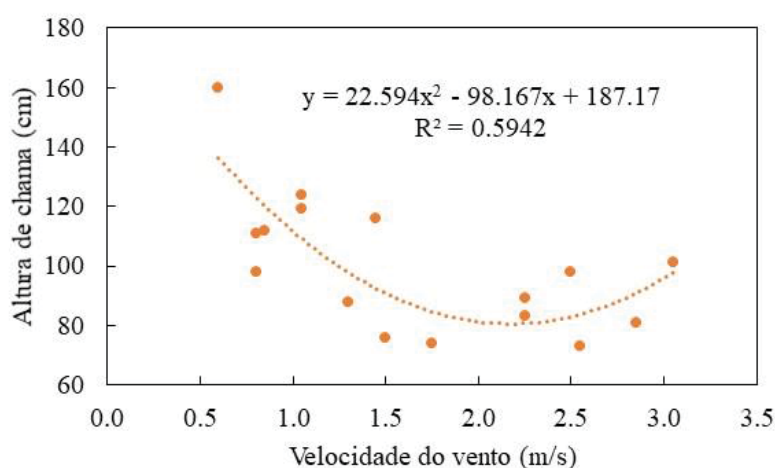
Silva (2018) cita que a velocidade do vento é um dos fatores que afetam tanto a velocidade e intensidade da linha de fogo, como o calor liberado e consumo de combustível fino, indo de encontro a Ganassoli Neto (2019), que observou correlação significativa desta variável meteorológica com diversos parâmetros do fogo. No entanto, a correlação entre as velocidades de propagação do fogo e do vento não foi observada neste experimento de queima contra o vento; porém a velocidade de propagação do fogo indicou correlação com outras variáveis meteorológicas: temperatura do ar ( $r = 0,6$ ) e umidade

relativa do ar ( $r = -0,6$ ). Ainda se observou uma correlação negativa em relação a porcentagem de material consumido ( $r = -0,6$ ).

Além das variáveis meteorológicas citadas, Silva (2018) sugere que o déficit de pressão de vapor de água é um dos principais preditores do comportamento do fogo, apresentando uma correlação positiva deste com a velocidade de propagação do fogo ( $r = 0,67$ ).

A média geral da altura de chama foi de 1,0 metro, superior ao registrado por Seger *et al.* (2013) (média de 0,84 m) para queimas contra o vento. No entanto os autores não observaram diferença estatística significativa entre as médias desta técnica em relação a queima a favor do vento, que indicou uma média de 1,34 metro. A análise estatística apontou uma correlação negativa ( $r = -0,6$ ) para altura de chama e velocidade do vento (FIGURA 35).

FIGURA 35 – RELAÇÃO ENTRE ALTURA DA CHAMA (cm) E VELOCIDADE DO VENTO ( $\text{m.s}^{-1}$ )



FONTE: A autora (2020).

Pode se observar que a altura da chama é maior quando a velocidade do vento é  $\leq 2 \text{ m.s}^{-1}$ , com comportamento decrescente até a velocidade de vento de  $2 \text{ m.s}^{-1}$ , aproximadamente. Tendo em vista a influência da velocidade do vento sobre a altura da chama, não se recomenda a estimativa de intensidade da linha de fogo por meio dessa variável. Segundo Soares, Batista e Tetto (2017), quando a inclinação da chama é inferior a  $45^\circ$ , sua altura é menor que o seu comprimento, logo seu uso pode subestimar a intensidade da linha de fogo.



Como esperado, a intensidade da linha de fogo apresentou correlação positiva com relação aos parâmetros de calor liberado ( $r = 0,7$ ) e carga de combustível fino total ( $r = 0,7$ ), indo de encontro com observado por Camargos *et al.* (2015). Além disso, Batista, Beutling e Pereira (2013) e Silva (2018) indicaram correlação positiva com a carga de combustível fino consumido, reforçando o observado no presente estudo ( $r = 0,6$ ). A intensidade da linha de fogo média observada foi de  $34,49 \text{ kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , inferior à média de  $50,68 \text{ kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  descrita por Seger *et al.* (2013).

O poder calorífico apresentou diferença estatística entre as áreas estudadas, com valores médios de 2.507,88 (área A) a 2.887,02 (área C), uma vez que é corrigido por meio do teor de umidade do material combustível ( $r = -0,99$ ). O teor de umidade do material combustível não apresentou demais correlações, porém Torres, Silva Júnior e Lima (2019) descrevem que a umidade dos combustíveis é o reflexo das condições meteorológicas e pode oscilar rapidamente, principalmente dos materiais finos, como evidenciado por Santos (2020), para classe morto, e por Alves *et al.* (2009).

Outro parâmetro que diferiu entre as áreas foi o calor liberado por unidade de área, que indicou correlação com a carga total de combustível fino ( $r = 0,8$ ), intensidade da linha de fogo ( $r = 0,7$ ), porcentagem de material fino consumido ( $r = 0,7$ ), além da anteriormente citada carga de combustível fino consumido.

Os valores médios observados de calor liberado variaram de  $1.751,81 \text{ kcal.m}^{-2}$  (área B) a  $2.948,33 \text{ kcal.m}^{-2}$  (área A), inferiores ao registrado por Seger *et al.* (2013), de  $4.508,92 \text{ kcal.m}^{-2}$ . Ao comparar a técnica contra e a favor do vento, os autores não evidenciaram diferença estatística significativa para o calor liberado.

#### 5.2.4 Incremento de biomassa

Foram realizadas cinco campanhas de campo para avaliar a carga total de biomassa fina e sua representatividade nas classes de material combustível em um período de 19 meses. A suficiência amostral, utilizando a carga úmida de combustível de cada campanha de campo, está apresentada na Tabela 18.

TABELA 18 – CÁLCULO DA SUFICIÊNCIA AMOSTRAL (N) PARA AS CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO (MASSA ÚMIDA)

Período de coleta	Número de parcelas amostradas	Classe	Suficiência de amostragem (N)					
			Média (Mg.ha <sup>-1</sup> )	Desvio	s <sup>2</sup>	t <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	N
Nov/Dez de 2017 3 meses pós-fogo	9	Material vivo	6,6	0,15	0,024	1,95	0,0175	3
		Material morto	0,0	0,00	0,000	1,95	0,0000	-
		Miscelânea	0,2	0,01	0,000	1,95	0,0000	9
		TOTAL	6,8	0,15	0,024	1,95	0,0185	3
Fev/Mar de 2018 6 meses pós-fogo	9	Material vivo	8,7	0,24	0,059	1,95	0,0301	4
		Material morto	2,2	0,07	0,004	1,95	0,0020	4
		Miscelânea	0,7	0,03	0,001	1,95	0,0002	7
		TOTAL	11,6	0,25	0,062	1,95	0,0538	2
Jun/Jul de 2018 10 meses pós-fogo	16	Material vivo	4,5	0,11	0,013	1,80	0,0082	3
		Material morto	3,5	0,09	0,009	1,80	0,0048	3
		Miscelânea	0,5	0,01	0,000	1,80	0,0001	3
		TOTAL	8,5	0,15	0,022	1,80	0,0288	1
Set/Out de 2018 13 meses pós-fogo	16	Material vivo	7,1	0,25	0,062	1,80	0,0202	6
		Material morto	3,8	0,07	0,005	1,80	0,0057	1
		Miscelânea	1,0	0,06	0,004	1,80	0,0004	16
		TOTAL	11,9	0,29	0,083	1,80	0,0563	3
Mar/Abr de 2019 19 meses pós-fogo	16	Material vivo	6,1	0,32	0,099	1,80	0,0148	12
		Material morto	5,5	0,29	0,083	1,80	0,0121	12
		Miscelânea	1,6	0,09	0,009	1,80	0,0010	16
		TOTAL	13,2	0,52	0,271	1,80	0,0693	7

FONTE: A autora (2020).

Devido à oscilação da quantidade do combustível entre as classes ao longo do período analisado, foi realizado um ajuste no número de parcelas amostradas, a fim de suprir o indicado pelo cálculo de suficiência amostral. Deste modo, pode se observar na coluna “N” que todas as classes atenderam a suficiência amostral exigida.

As médias obtidas e os resultados do teste de comparação de médias, referentes à carga do material combustível fino (seco, em Mg.ha<sup>-1</sup>) e a representatividade de cada classe para as cinco campanhas de campo estão apresentadas na Tabela 19.

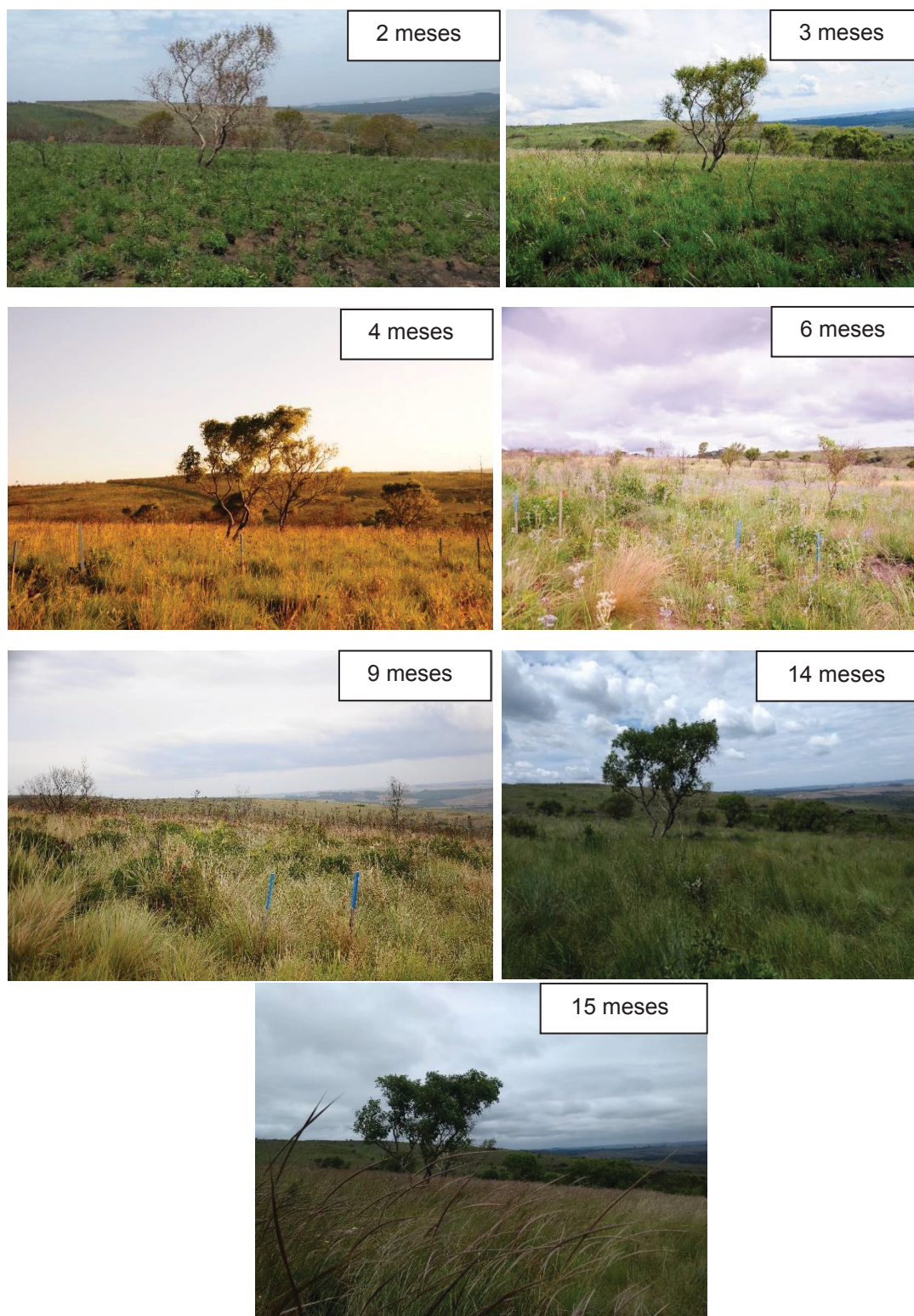
TABELA 19 – CARGA MÉDIA ( $\text{Mg.ha}^{-1}$ ), COMPARAÇÃO DE MÉDIAS E REPRESENTATIVIDADE DAS CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL HERBÁCEO (MASSA SECA)

Período de coleta	Carga de material combustível herbáceo (massa seca)							
	Vivo		Morto		Miscelânea		Total	
	Mg.ha <sup>-1</sup>	%	Mg.ha <sup>-1</sup>	%	Mg.ha <sup>-1</sup>	%	Mg.ha <sup>-1</sup>	
Nov/Dez de 2017	2,28 <sub>ab</sub>	94,91	0,00 <sub>a</sub>	00,00	0,12 <sub>a</sub>	5,09	2,40 <sub>a</sub>	
Fev/Mar de 2018	3,59 <sub>c</sub>	65,73	1,36 <sub>b</sub>	24,95	0,51 <sub>b</sub>	9,32	5,46 <sub>bc</sub>	
Jun/Jul de 2018	2,17 <sub>a</sub>	42,66	2,53 <sub>c</sub>	49,62	0,39 <sub>ab</sub>	7,73	5,09 <sub>b</sub>	
Set/Out de 2018	3,15 <sub>bc</sub>	48,45	2,70 <sub>c</sub>	41,52	0,65 <sub>b</sub>	10,02	6,49 <sub>cd</sub>	
Mar/Abr de 2019	2,77 <sub>abc</sub>	36,35	3,82 <sub>d</sub>	50,10	1,03 <sub>c</sub>	13,55	7,62 <sub>d</sub>	

FONTE: A autora (2020).

Constatou-se que, ao final de 19 meses a carga total de material combustível foi inferior a descrita por Rodrigues (2018) e Seger (2016), de aproximadamente  $12,0 \text{ Mg.ha}^{-1}$ . A representatividade de cada classe também diferiu da apresentada pelos autores, Seger (2016) descreveu a seguinte representatividade por classe: 9,97% vivo; 55,16% morto; 34,87% miscelânea. A Figura 36 apresenta a modificação da paisagem ao longo do período estudado.

FIGURA 36 – ACOMPANHAMENTO DE INCREMENTO DE BIOMASSA EM UM PERÍODO DE 19 MESES



FONTE: A autora (2020).

Seger (2015) observou que a carga total de biomassa em área de estepe se recompôs em aproximadamente seis meses. O autor sugere que as condições meteorológicas e ambientais da área tenham sido os principais regentes para o acelerado incremento de biomassa total, uma vez que as queimas foram realizadas após o inverno (estação seca) e seguida da estação chuvosa, situação similar à do presente estudo. Dimitrakopoulos e Bemmerzouk (2002) apontam que a deficiência de umidade na camada superficial do solo nesta fase inicial, ou sua redução pelo tempo seco e quente, pode influir no crescimento.

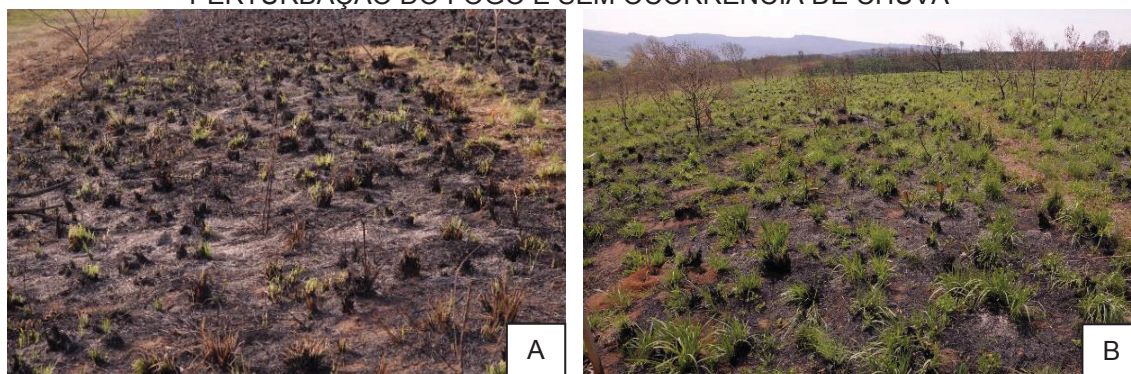
A este respeito, Rissi (2016) relatou um retardo no incremento de biomassa total, em comparação à taxa de biomassa anterior, para queimas realizadas antes (12 meses) e no meio da estação seca (7 meses) em relação a queimas realizadas ao final da estação seca (3 meses) em áreas de campo sujo de cerrado.

A carga de biomassa viva se recuperou nos primeiros dois meses, sendo o início das rebrotas observado sete dias após a queima (FIGURA 37), Seger (2015), por sua vez, as evidenciou apenas dois dias após a ação do fogo. Segundo Dalazoana (2010), as touceiras (céspedes) são úteis na resistência da planta a ação do fogo, o que permite a rebrota quase imediata após a perturbação, sendo característica das gramíneas. Rissi (2016) evidenciou que a massa viva se reestabeleceu em aproximadamente três meses, independente da época de queima, enquanto Cardoso *et al.* (2000) observaram um período em torno de quatro meses.

Seger (2015) aponta o banco de sementes como um influenciador para a rápida resposta da vegetação, corroborando com Coutinho (1990). Este último ainda descreve que espécies perenes apresentam órgãos subterrâneos que, devido ao isolamento proporcionado pela camada superficial do solo, escapam à ação destrutiva do fogo, podendo brotar dias ou semanas após sua ocorrência. Outro fator mencionado por Coutinho (1990) é a disponibilização após a queima de nutrientes minerais imobilizados na biomassa seca inerte.



FIGURA 37 – REGENERAÇÃO DE HERBÁCEAS SETE DIAS (A) E 20 DIAS (B) APÓS A PERTURBAÇÃO DO FOGO E SEM OCORRÊNCIA DE CHUVA



FONTE: A autora (2020).

Durante o período analisado a classe de material vivo apresentou maior representatividade entre as demais, oscilando sua carga sazonalmente. Quanto à variabilidade de carga de biomassa viva, Rissi (2016) aponta a influência de precipitação e outras variáveis meteorológicas como principais fatores.

As queimas foram realizadas ao final do inverno (estação seca), com a primeira chuva em 29 de setembro (31,2 mm) (ANA, 2017). Sendo assim, as duas primeiras coletadas abrangeram a estação chuvosa, que se inicia em meados de setembro e se estende até março, sendo janeiro e fevereiro os meses com maiores taxas de precipitação. Por sua vez, a menor carga de material vivo foi observada em julho que, assim como agosto, apresentou as menores taxas de precipitação e ocorrências de geadas.

O material combustível campestre apresenta uma particularidade referente a cura de seu material (*grass curing*) (GARVEY; MILLIE, 2000), que se refere ao processo de senescência da grama e a transição de combustíveis vivos para o componente morto do leito, podendo também incluir arbustos e outras ervas em alguns sistemas (DUFF; BESSEL; CRUZ, 2019), que afeta o comportamento do fogo da seguinte forma: a) eleva gradualmente a quantidade de material combustível morto; e b) reduz a umidade do combustível, que pode elevar o perigo de ocorrer ignição e aumenta a intensidade e a velocidade de propagação do fogo (GARVEY; MILLIE, 2000).

A biomassa morta foi observada a partir da segunda campanha de campo (cinco meses após as queimas), indo de encontro ao observado por Cardoso *et al.* (2003), que descreveram sua ausência nos primeiros seis meses após queima tardia em campo nativo no Pantanal. Porém, estudos já



evidenciaram períodos de dez meses sem presença significativa de material morto (CARDOSO *et al.*, 2000). Esta classe de combustível indicou incremento linear, atingindo uma carga de 3,82 Mg.ha<sup>-1</sup> aos 19 meses pós queima, similar à carga de combustível morto descrita por Seger (2015), porém ainda inferior. Em comparativo com Seger (2016) e Rodrigues (2018), a classe miscelânea indicou carga 4,1 vezes inferior e também com comportamento crescente. Seger (2015) relata que essa elevada taxa de incremento de material morto e miscelânea se dá, a grosso modo, pelo ciclo curto das plantas que morrem com menos de um ano após a regeneração.

A classe de combustível morto indicou uma representatividade de aproximadamente 50% em relação a carga total para o levantamento de março/abril de 2019. Segundo Duff, Bessel e Cruz (2019), o momento e a taxa de cura dependem das adaptações das espécies e das condições climáticas, e são definidos principalmente pelos ciclos de produtividade, em que a senescência é um mecanismo das plantas para persistirem nas estações em que os recursos são limitados, o que resulta em alterações significativas na inflamabilidade do material combustível.

Chenney, Gould e Catchpole (1998) indicaram a não ocorrência de incêndios a um grau de cura inferior a 50% em vegetação campestre australiana. Porém, para mesma vegetação, Cruz *et al.* (2015) evidenciaram, a sustentação da propagação do fogo em pastagens com grau de cura de 20%. Entretanto, os autores reiteram que o coeficiente de cura está relacionado a fatores como tipo (anual e/ou perene), espécie e clima. Não foi observado na literatura informação relacionando grau de cura, probabilidade de ignição e sustentabilidade de combustão para campos nativos no Brasil. Contudo, Rissi (2016) descreveu, para campo sujo de cerrado, que o potencial de queima com relação à biomassa é restabelecido logo após um ano da última queima, independente da estação em que foi executada. Além das cargas de material combustível, também foi analisado o seu conteúdo de umidade, apresentado na Tabela 20.

TABELA 20 – PERCENTUAIS MÉDIOS DO CONTEÚDO DE UMIDADE DAS CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL

Período de coleta	Teor de umidade do material combustível herbáceo (%)			
	Vivo	Morto	Miscelânea	Média
Nov/Dez de 2017	188,13	0,00	64,27	181,43
Fev/Mar de 2018	148,94	61,22	52,56	113,10
Jun/Jul de 2018	111,44	37,84	26,04	68,85
Set/Out de 2018	128,60	41,05	53,43	82,75
Mar/Abr de 2019	119,94	43,41	52,30	73,38

FONTE: A autora (2020).

O teor de umidade é um dos principais fatores que regem a ignição e os parâmetros relacionados ao comportamento do fogo (ALVES *et al.*, 2009; JOLLY; HADLOW; HUGUET, 2014; CRUZ, *et al.*, 2015), seu conhecimento auxilia no planejamento de queimas controladas e na estimativa do perigo de ocorrência de incêndios (ALVES *et al.*, 2009; ZHANG *et al.*, 2020). Soares, Batista e Tetto (2017) explicam que a umidade do material combustível é influenciada pelas condições meteorológicas, podendo assim variar rapidamente, com a ressalva de que a resposta e os mecanismos de retenção de água do material combustível dependem de sua condição fisiológica.

Nos combustíveis vivos o conteúdo de umidade varia por meio dos processos ecofisiológicos da planta, que estão relacionados tanto ao ciclo da água (captação de água do solo, armazenamento e transpiração) como ao ciclo de carbono (fotossíntese, respiração, alocação de carbono, estágio fenológico) (JOLLY; JOHNSON, 2018).

O material vivo apresentou variação em seu teor de umidade de 111,44 a 188,13%. Este último valor foi observado no início da fase de crescimento, corroborando com Seger (2015), que evidenciou um teor de umidade médio de 243,98% dois meses após ação do fogo. Soares, Batista e Tetto (2017) descrevem que o teor de umidade em combustíveis vivos pode variar de 50 a 300% em função do seu estágio de desenvolvimento, folhagem entrando em dormência a brotação nova (novo ciclo de crescimento), respectivamente.

Por sua vez, o teor de umidade dos combustíveis finos mortos é influenciado principalmente por fatores meteorológicos (ZHANG *et al.*, 2020). O ganho de umidade pode ser resultado da condensação, adsorção de vapor de água ou processo de precipitação, enquanto a perda se dá por meio de dessorção e evaporação (VINEY, 1991). O menor teor observado para a classe

morto (37,84%) e miscelânea (26,04%) correspondeu ao período de inverno (estação seca).

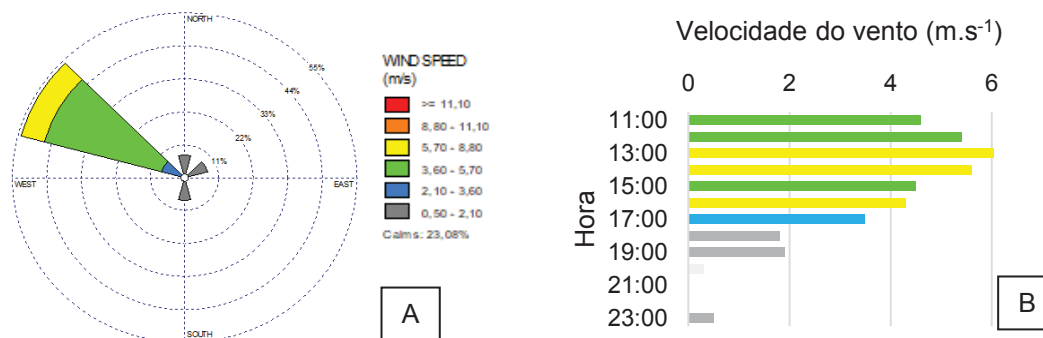
Cruz *et al.* (2015) apontaram a significância do conteúdo integral de umidade do combustível na redução na velocidade de propagação do fogo. De modo geral, o teor de umidade apresentou um comportamento decrescente, de 181,43 para 73,38% para o período analisado. Essa tendência também foi descrita por Seger (2015), que observou um teor de umidade geral de aproximadamente 50% em área com um ano de regeneração. O teor de umidade de 73,38% observado para abril foi superior ao indicado por Rodrigues (2018) para a estação de outono (TU de 50%), até mesmo para estação de verão (TU de 67%).

### 5.3 MODELO DE COMBUSTÍVEL PARA ESTEPE *stricto sensu* DO PEVV – FARSITE

#### 5.3.1 Condições meteorológicas para o dia 4 de setembro de 2017

Conforme o IAP (2004) e IAPAR (2019), o sentido predominante do vento na região de estudo é nordeste, porém no momento do incêndio de 4 de setembro de 2017 o vento predominante foi noroeste (FIGURA 38A). Segundo os mesmos institutos, a velocidade do vento em média é de aproximadamente 4 m.s<sup>-1</sup>, sendo que a média observada no período do incêndio foi em torno de 2,9 m.s<sup>-1</sup>, com máxima observada de 6,1 m.s<sup>-1</sup>, às 13h (FIGURA 38B).

FIGURA 38 – SENTIDO (A) E VELOCIDADE DO VENTO (m.s<sup>-1</sup>) (B) PARA O PERÍODO DAS 11H ÀS 23H

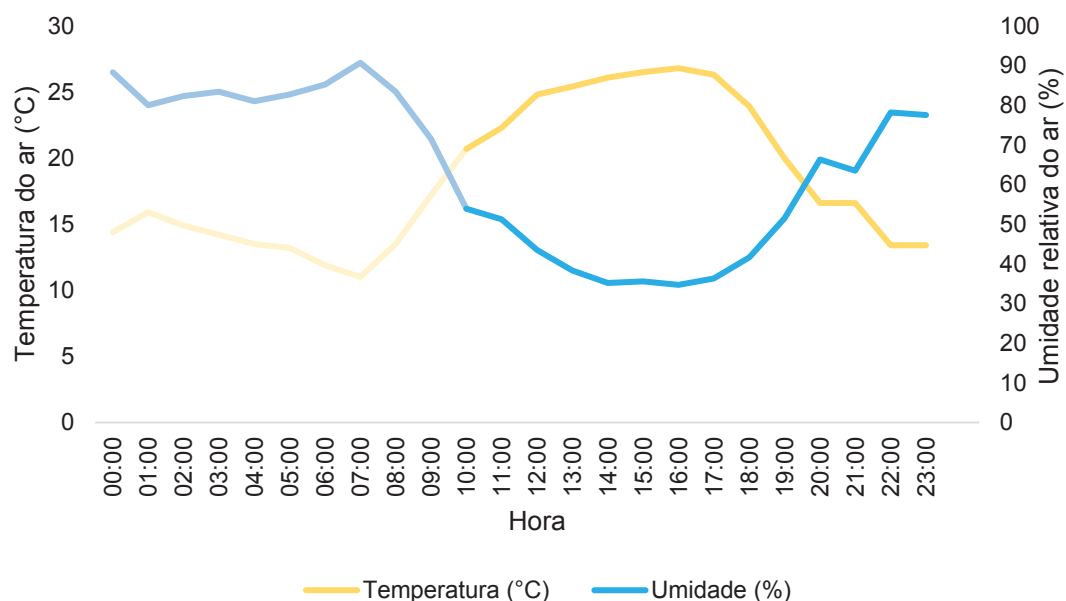


FONTE: SIMEPAR (2017), elaborado pela autora (2020).

Segundo Zheng *et al.* (2017), o vento é um fator importante que deve ser considerado em modelagens, uma vez que suas duas características (velocidade e sentido) podem afetar significativamente a propagação do fogo. Hoffmann *et al.* (2011) afirmaram que a velocidade do vento contribuiu para a inflamabilidade de forma substancial em suas simulações para áreas de savana, o que, conforme os autores, é consistente com observações de incêndios nesta tipologia.

Historicamente, as temperaturas médias de máxima e mínima para o mês de setembro foram 22,6 e 11,8 °C, respectivamente, enquanto a umidade relativa média do ar foi de 75% (IAPAR, 2019). As duas variáveis registradas durante o período do incêndio estão apresentadas na Figura 39.

FIGURA 39 – TEMPERATURA DO AR (°C) E UMIDADE RELATIVA DO AR (%) PARA O DIA 4 DE SETEMBRO DE 2017, COM DESTAQUE PARA O PERÍODO DAS 11H ÀS 23H



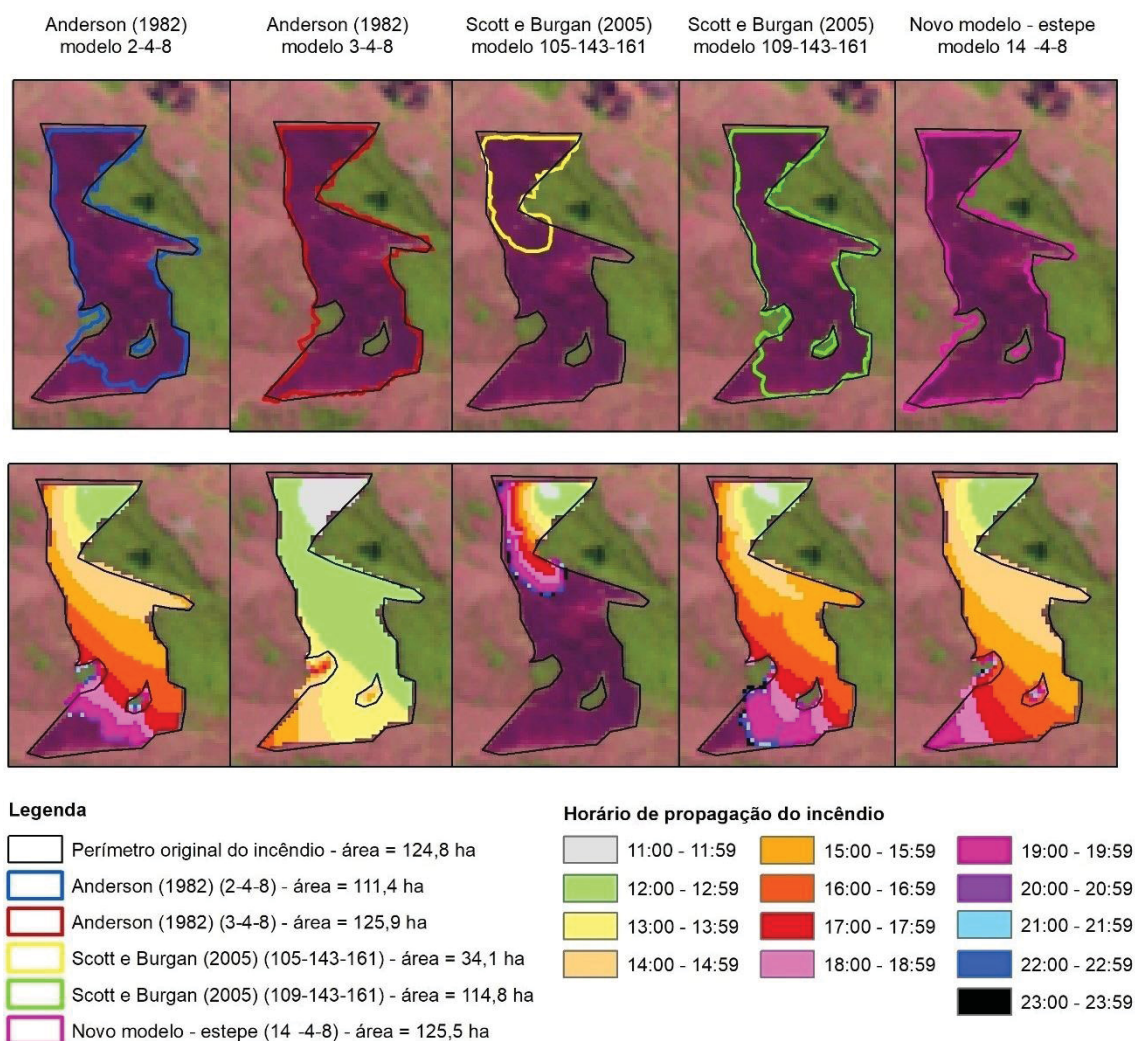
FONTE: SIMEPAR (2017), elaborado pela autora (2020).

A temperatura média do ar do dia foi de 18,4 °C, com a mínima (11 °C) registrada às 7h e a máxima (26,8 °C) às 16h. A umidade relativa média do ar nesse mesmo período foi de 64%, sendo a mínima (34,7%) registrada às 16h e a máxima (90,7%) às 7h.

### 5.3.2 Modelos de combustíveis para representação da paisagem

O incêndio florestal atingiu principalmente a vegetação de campo, totalizando aproximadamente 124 ha. O perímetro original do incêndio e os simulados, bem como a espacialização da progressão simulada por cada modelo, estão apresentados na Figura 40.

FIGURA 40 – PERÍMETRO E PROGRESSÃO HORÁRIA SIMULADOS PARA CINCO ARRANJOS DE MODELOS DE COMBUSTÍVEIS

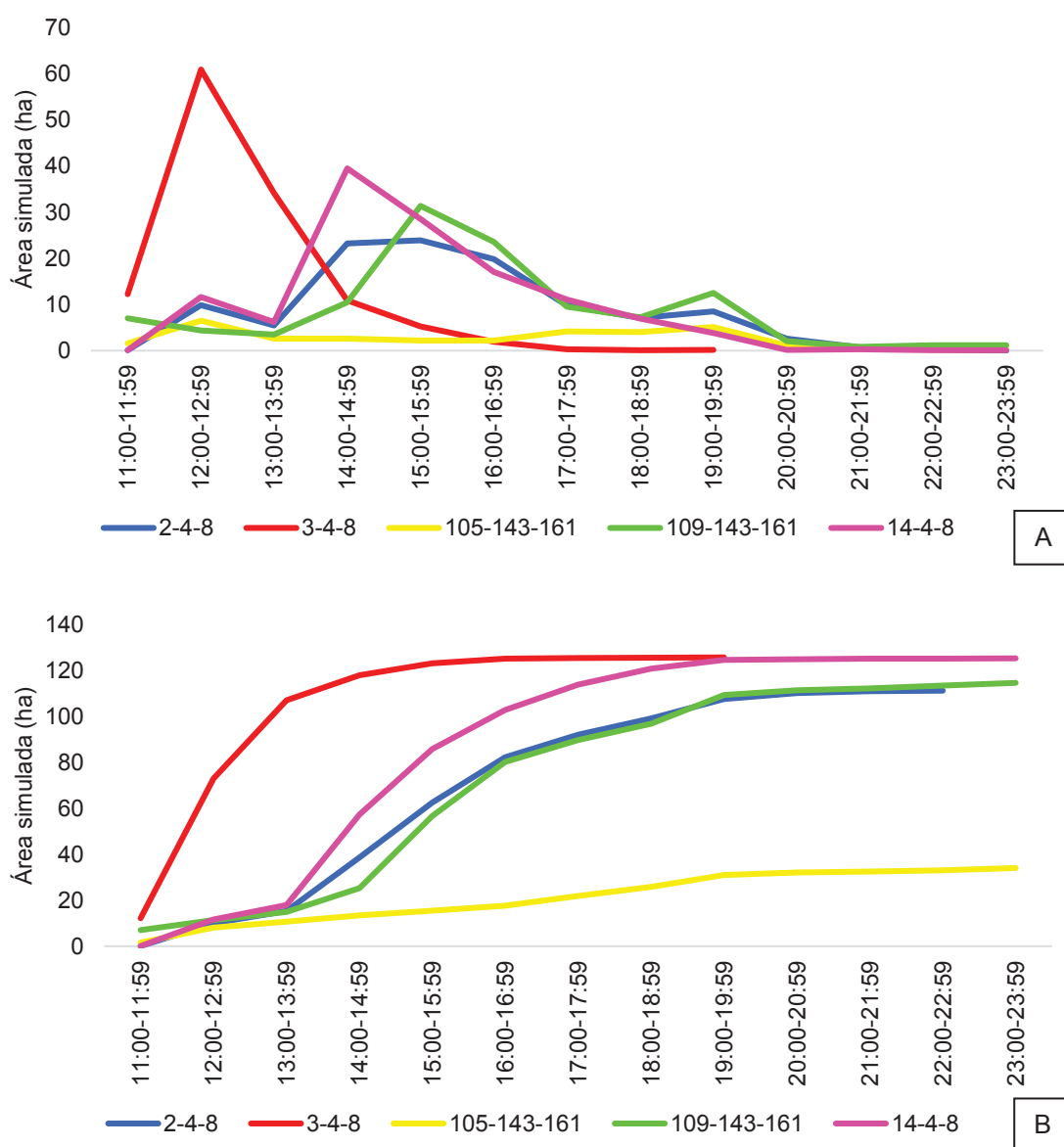


FONTE: A autora (2020).

O modelo 105-143-161 de Scott e Burgan (2005) resultou na menor área simulada (34,1 ha), não sendo representativo. Por outro lado, os modelos 3-4-8, de Anderson (1982) e o novo modelo sugerido (modelo 14) superestimaram a

área queimada, com aproximadamente 125 ha. A simulação do avanço de fogo por esses modelos resultou na queima completa de toda área no interior do perímetro, adentrando inclusive os capões de FOM, os quais não foram atingidos originalmente pelo incêndio. Os demais modelos respeitaram o desenho original do incêndio, porém subestimaram a área queimada. Além dos parâmetros desenho e área, também foi analisado o de tempo de progressão do incêndio simulado (FIGURA 41).

FIGURA 41 – ÁREA SIMULADA (HA) A CADA HORA (A); E ÁREA SIMULADA ACUMULADA (HA) (B), NO PERÍODO DE 13H PARA CINCO ARRANJOS DE MODELOS DE COMBUSTÍVEIS



FONTE: A autora (2020).



O modelo 3-4-8 atingiu o máximo de área simulada delimitada em 516 minutos, ou seja, às 18h36, sendo o menor tempo observado entre as simulações. O modelo indicou que 87% da área foi atingida nas três primeiras horas de simulação, sendo que entre 12h e 12h59, segundo o modelo, foram atingidos 58,7 ha, enquanto as menores áreas queimadas foram observadas após às 17h, em média 0,18 ha a cada hora. Os demais modelos apresentaram tempo de simulação acima de 700 minutos.

O modelo 2-4-8 indicou um tempo total de simulação de 708 minutos (às 21h48) e atingiu 51% da área simulada aos 280 minutos. Os intervalos de tempo que concentraram as maiores áreas queimadas foram: 14h – 14h59 (22,68 ha); 15h – 15h59 (23,31 ha); e 16h – 16h59 (19,35 ha), porém a simulação constatou uma área inferior à original, assim como o modelo 109-143-161, porém este apresentou um tempo de simulação de 778 minutos. O modelo alcançou 51% de área aos 304 minutos, sendo que os intervalos de tempo com maior área queimada, foram: 15h – 15h59 (30,51 ha) e 16h – 16h59 (22,95 ha).

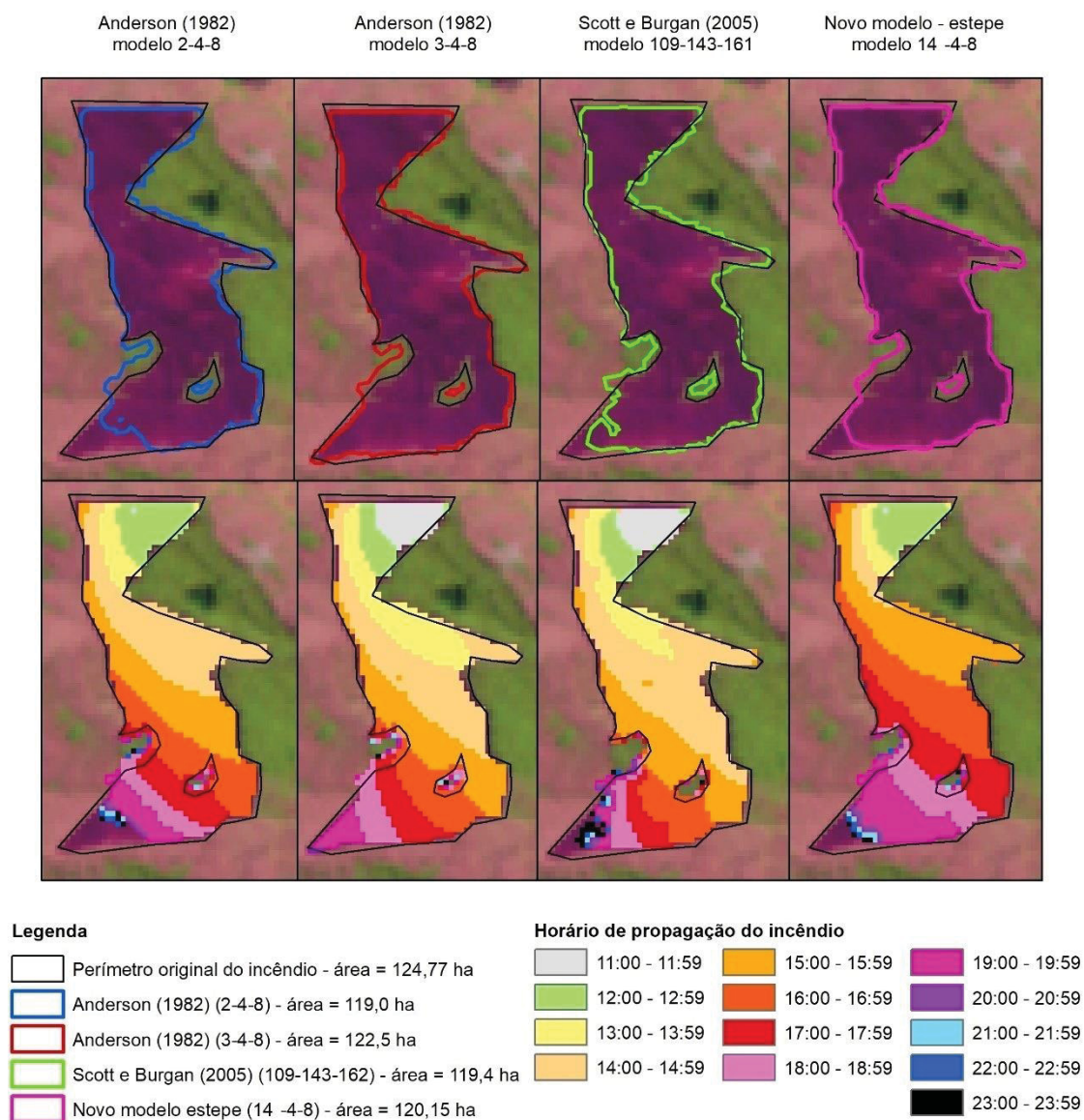
O novo modelo (14) teve um tempo de simulação de 779 minutos. Os 51% de área simulada foram observados aos 253 minutos e a maior área queimada foi constatada entre às 14h – 14h59 (39,5 ha). Para os três últimos modelos citados, as menores áreas queimadas foram observadas após 20h.

A partir do observado, fez-se o ajuste dos modelos, exceto para o modelo 105-143-161, uma vez que a área simulada por este não foi representativa.

### 5.3.3 Ajuste dos modelos combustíveis

O ajuste dos modelos levou em consideração o tempo de ocorrência (780 minutos) e o desenho do incêndio. Apenas foi modificada a velocidade de propagação (*ROS Adjustment*), sem alterar os demais parâmetros. A espacialização do tempo de progressão e a área simulada estão apresentados na Figura 42.

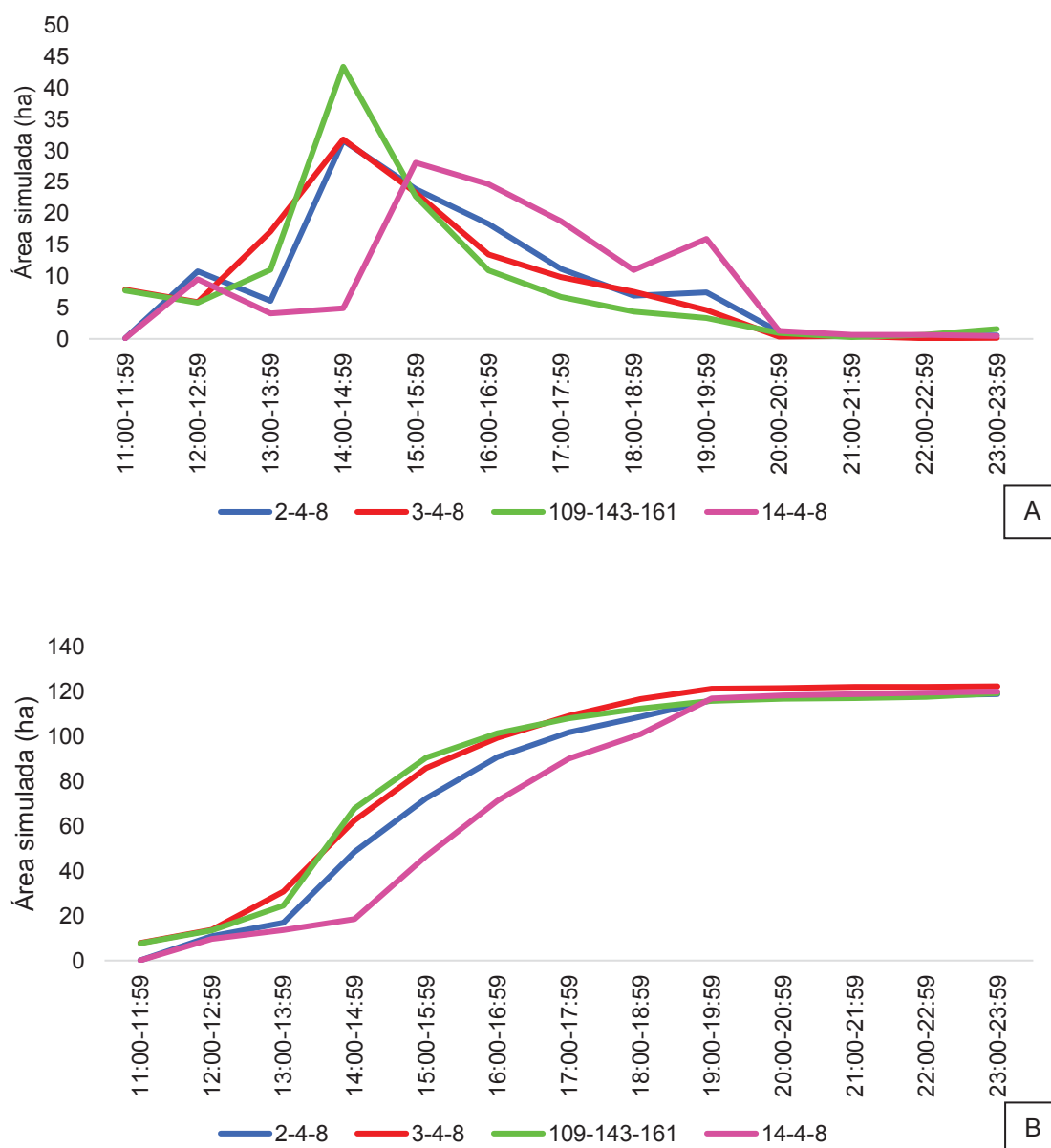
FIGURA 42 – PERÍMETRO E PROGRESSÃO HORÁRIA SIMULADOS PARA QUATRO ARRANJOS DE MODELOS DE COMUSTÍVEIS AJUSTADOS



FONTE: A autora (2020).

Após o ajuste, todos os modelos apresentaram valores inferiores à área original. O modelo 3-4-8 indicou a maior área simulada, 122,5 ha, entretanto pode-se observar que o modelo ainda adentrou capões de FOM, assim como o modelo 2-4-8, que atingiu uma área de 119,0 ha, menor área simulada e similar ao modelo 109-143-161, porém este último apresentou um desenho próximo ao real. O modelo 14-4-8 simulou uma área de 120,15 ha (em 779 min), inferior à sua versão sem ajuste, entretanto o modelo ajustado reduziu a faixa de avanço em capões de FOM. Para todos os modelos foi analisada a progressão horária da simulação (FIGURA 43).

FIGURA 43 – ÁREA SIMULADA (HA) A CADA HORA (A); E ÁREA SIMULADA ACUMULADA (HA) (B), NO PERÍODO DE 13H PARA QUATRO ARRANJOS DE MODELOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS



FONTE: A autora (2020).

O tempo simulado pelos modelos para o incêndio variou de 774 a 779 minutos. O modelo 14-4-8 indicou maior área queimada (28,1 ha) entre 15h – 15h59 e na próxima hora completou 51% de área atingida, enquanto os demais modelos indicaram maior área queimada entre 14h – 14h59 e completaram 51% de área atingida entre 15h – 15h59. Assim como nos modelos sem ajustes, as menores áreas foram observadas após às 20h.

Posteriormente calculou-se o *Skill Score* e a Porcentagem de Sucesso para os modelos ajustados, que estão apresentados na Tabela 21, juntamente com os valores aplicados no ajuste. A espacialização e as tabelas de contingências estão nos Apêndices 3 e 4.

TABELA 21 – *SKILL SCORE*, PORCENTAGEM DE SUCESSO E AJUSTE APLICADO AOS QUATRO ARRAJOS DE MODELOS DE COMBUSTÍVEIS

Modelo	<i>Skill Score</i>	Porcentagem de Sucesso	Ajuste (ADJ)
Anderson (1982) 2-4-8	0,848	93,30	1,0 +0,1
Anderson (1982) 3-4-8	0,882	94,76	1,0 -0,6
Scott e Burgan (2005) 109-143-161	0,884	94,86	1,0 +0,4
Novo modelo - estepe 14*-4-8	0,869	94,22	1,0 -0,3

FONTE: A autora (2020).

Os quatro modelos ajustados apresentaram valores de SS e PS elevados, e, portanto, satisfatórios. O desempenho superior a 90% para a PS foi devido o perímetro do incêndio estar delimitado no momento da simulação.

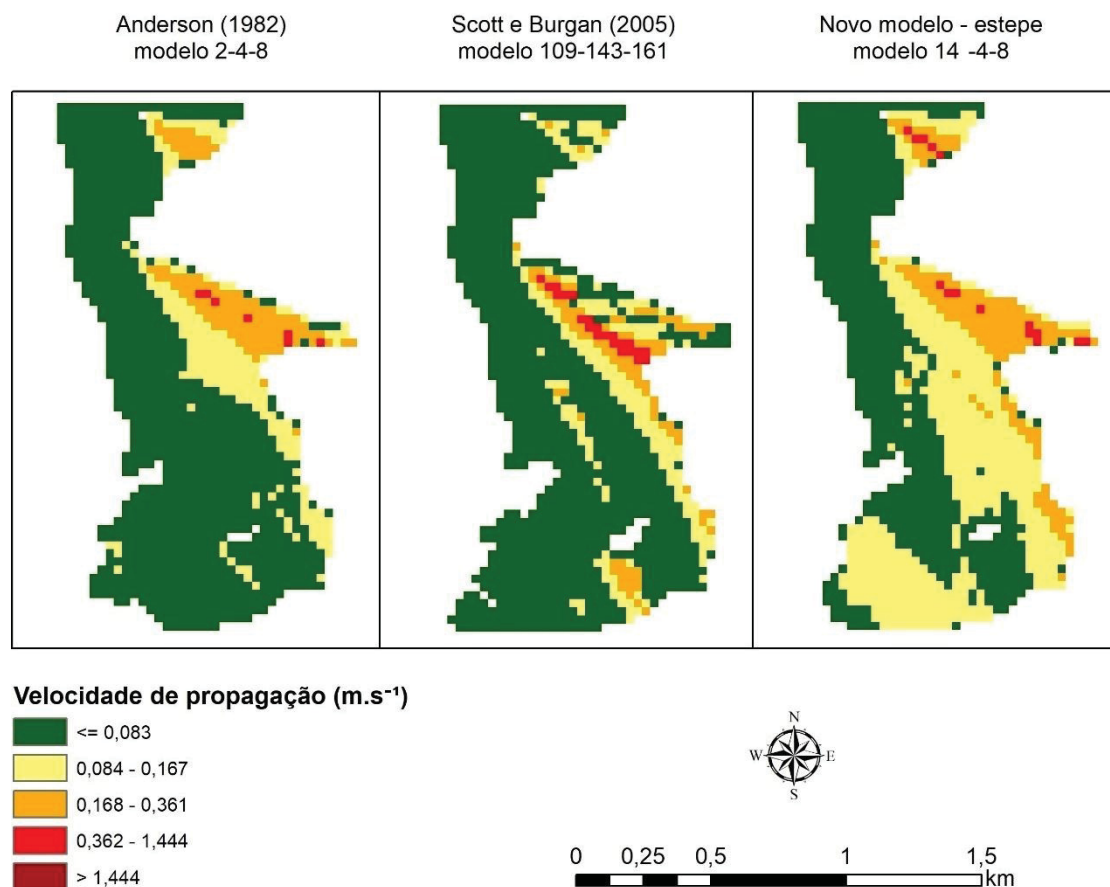
Para o modelo 3-4-8 foi empregado um ajuste de -0,6, entretanto Stratton (2009) descreve que uma alteração substancial no arquivo de ajuste indica que outro modelo de combustível pode ser necessário. Tendo isso em vista, optou-se por analisar os parâmetros de comportamento do fogo dos modelos ajustados, exceto para o modelo 3-4-8.

#### 5.3.4 Parâmetros simulados do comportamento do fogo

Foram analisados os seguintes parâmetros simulados do comportamento do fogo: velocidade de propagação ( $\text{m.s}^{-1}$ ); altura de chama (metros); intensidade da linha do fogo ( $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ); e calor liberado por unidade de área ( $\text{kcal.m}^{-2}$ ) para os três modelos.

As velocidades de propagação foram classificadas segundo a dificuldade de supressão (MCARTHUR, 1973), de baixa ( $\leq 0,083 \text{ m.s}^{-1}$ ) a extrema ( $> 1,444 \text{ m.s}^{-1}$ ). A espacialização dessas classes está apresentada na Figura 44.

FIGURA 44 – ESPACIALIZAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO (m.s<sup>-1</sup>) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS



FONTE: A autora (2020).

A representatividade de área atingida por classe de velocidade está apresentada na Tabela 22.

TABELA 22 – REPRESENTATIVIDADE DE ÁREA SIMULADA POR CLASSE DE DIFICULDADE DE SUPRESSÃO, SEGUNDO A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO FOGO (m.s<sup>-1</sup>) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS

Classe de dificuldade de supressão	Velocidade de propagação (m.s <sup>-1</sup> )	Modelos de combustíveis					
		2-4-8		109-143-161		14-4-8	
		Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Baixo	≤ 0,083	89,9	75,6	91,8	76,9	58,6	48,8
Moderado	0,084 - 0,167	17,8	14,9	16,9	14,2	45,7	38,0
Alto	0,168 - 0,361	10,6	8,9	8,6	7,2	14,4	12,0
Muito alto	0,362 - 1,444	0,7	0,6	2,0	1,7	1,4	1,2
Total		119,0	100,0	119,4	100,0	120,1	100,0

FONTE: A autora (2020).

Para todos os modelos não houve valores enquadrados na classe extrema, por outro lado a classe baixo obteve maior representatividade. Para os modelos 2-4-8 e 109-143-161 essa última classe teve representatividade de

aproximadamente 76%, e de modo geral a distribuição de área em cada classe foi similar. Por sua vez, o modelo 14-4-8 indicou 48,8% da área simulada na classe baixo, seguido de 38% na classe moderado.

Os dois primeiros modelos não apresentaram diferença estatística significativa entre si sobre a velocidade de propagação do fogo, sendo os valores médios obtidos de 0,0672 e 0,0720 m.s<sup>-1</sup> e máximos de 0,5908 e 0,5209 m.s<sup>-1</sup> para 109-143-161 e 2-4-8, respectivamente. Porém, esses indicaram diferença estatística significativa para a velocidade de propagação em relação ao modelo 14-4-8, cuja média foi de 0,0987 m.s<sup>-1</sup> e máxima de 0,4605 m.s<sup>-1</sup> (TABELA 23).

TABELA 23 – MÉDIAS DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO (m.s<sup>-1</sup>) DE FOGO PARA OS MODELOS

Modelos	N	Veloc. propagação (m.s <sup>-1</sup> )
109-143-161	1286	0,0672 <sup>a</sup>
2-4-8	1278	0,0720 <sup>a</sup>
14-4-8	1299	0,0987 <sup>b</sup>

Contraste	Sig.	Diferença	+/- Limites
109-143-161 - 14-4-8	*	0,0314712	0,00557403
109-143-161 - 2-4-8		-0,00476848	0,00559677
14-4-8 - 2-4-8	*	0,0267027	0,00558279

FONTE: A autora (2020).

NOTA: Método 95,0% LSD

\* indica diferença estatística significativa; letras diferentes indicam diferença estatística significativa

Ao analisar de forma isolada a estepe *stricto sensu*, a média de velocidade de propagação simulada foi de 0,078 m.s<sup>-1</sup> (2-4-8), 0,080 m.s<sup>-1</sup> (109-143-161) e 0,123 m.s<sup>-1</sup> (14-4-8). Fernandes (2003) obteve velocidades de propagação simuladas de 0,19 e 0,39 m.s<sup>-1</sup> para campos e pastagens, respectivamente, classificadas pelo autor como velocidade de propagação alta.

Para pesquisas *in loco*, tratando-se de áreas de campo seco no Brasil e com quantidade de material combustível similar ao da área estudada, observou-se uma variação de velocidade de propagação do fogo a favor do vento de 0,04 m.s<sup>-1</sup> (SEGER *et al.*, 2013; REYES, 2017) a 0,62 m.s<sup>-1</sup> (GANASSOLI NETO, 2019). Conforme McArthur (1973), ao considerar as variáveis ambientais do dia do incêndio (*grass curing*: 85%; temperatura do ar: 18,6 °C; umidade relativa do ar: 65,2%; velocidade do vento: 3,2 m.s<sup>-1</sup>; e quantidade de material combustível fino total: 8,4 Mg.ha<sup>-1</sup>), a velocidade média de propagação do fogo foi de aproximadamente 0,28 m.s<sup>-1</sup>, indo de encontro com o observado por Silva (2018)

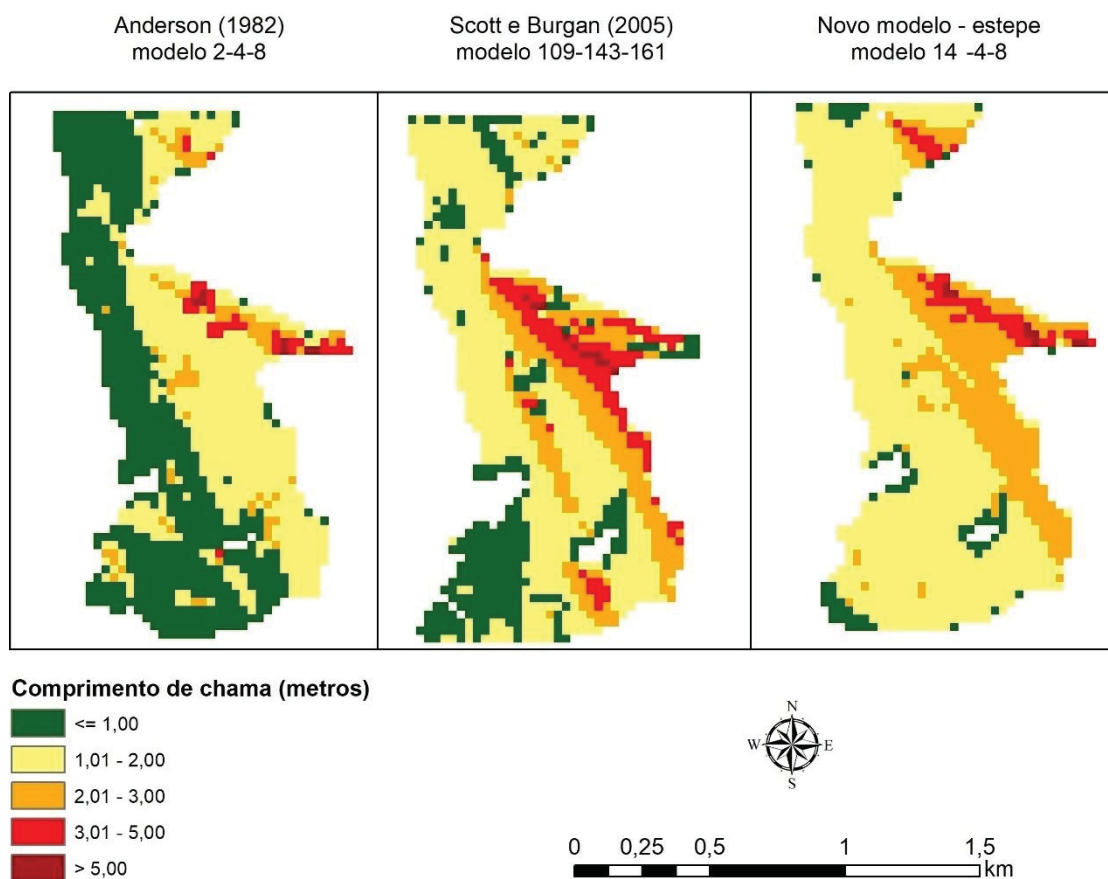


em áreas campestres ( $0,25 \text{ m.s}^{-1}$ ) e savanas ( $0,24 \text{ m.s}^{-1}$ ), indicando nível moderado de dificuldade de supressão (MCARTHUR, 1973).

Em simulações em áreas de capoeira a média de velocidade de propagação resultante foi de  $0,105 \text{ m.s}^{-1}$  (FERNANDES, 2003), enquanto no presente estudo se obtiveram valores de  $0,110 \text{ m.s}^{-1}$  (2-4-8),  $0,0182 \text{ m.s}^{-1}$  (109-143-161) e  $0,1214 \text{ m.s}^{-1}$  (14-4-8).

Na Figura 45 está representada a espacialização conforme o comprimento de chama simulado para área de estudo, que estão classificadas em função da dificuldade de supressão (MCARTHUR, 1973), de baixa ( $\leq 1$  metro) a extrema ( $> 5,5$  metros).

FIGURA 45 – ESPACIALIZAÇÃO DO COMPRIMENTO DE CHAMA (m) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS



FONTE: A autora (2020).

A representatividade de área atingida por comprimento de chama (m) está apresentada na Tabela 24.

TABELA 24 – REPRESENTATIVIDADE DE ÁREA SIMULADA POR CLASSE DE DIFICULDADE DE SUPRESSÃO, SEGUNDO O COMPRIMENTO DE CHAMA (m) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS

Classe de dificuldade de supressão	Comprimento de chama (metros)	Modelos de combustíveis					
		2-4-8		109-143-161		14-4-8	
		Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Baixo	≤ 1,00	57,6	48,4	25,4	21,3	6,7	5,5
Moderado	1,01 - 2,00	49,9	41,9	61,2	51,2	80,8	67,3
Alto	2,01 - 3,00	7,7	6,5	21,5	18,0	27,2	22,6
Muito alto	3,01 - 5,00	3,1	2,6	10,2	8,6	4,6	3,8
Extremo	> 5,00	0,7	0,6	1,0	0,9	0,8	0,8
Total		119,0	100	119,4	100,0	120,1	100

FONTE: A autora (2020).

Para todos os modelos a classe extremo (> 5 metros) teve menor representatividade (inferior a 1%), entretanto não ultrapassou o valor de 6,5 metros de comprimento de chama. O modelo 2-4-8 concentrou a porcentagem de área nas classes baixo (48,4%) e moderado (41,9%), enquanto esta última classe foi a mais representativa para os outros dois modelos, com 51,2% para o modelo 109-143-161 e 67,3% para o modelo 14-4-8. O comprimento de chama apresentou diferença estatística significativa entre os três modelos, com suas médias apresentadas na Tabela 25.

TABELA 25 – MÉDIAS DE COMPRIMENTO DE CHAMA (m) PARA OS MODELOS

Modelos		N	Comprimento de chama (m)	
2-4-8		1278	1,19	a
109-143-161		1286	1,69	b
14-4-8		1299	1,79	c

Contraste			Sig.	Diferença	+/- Limites
109-143-161	-	14-4-8	*	0,0953781	0,061477
109-143-161	-	2-4-8	*	0,494478	0,0617278
14-4-8	-	2-4-8	*	0,589856	0,0615736

FONTE: A autora (2020).

NOTA: Método 95,0% LSD

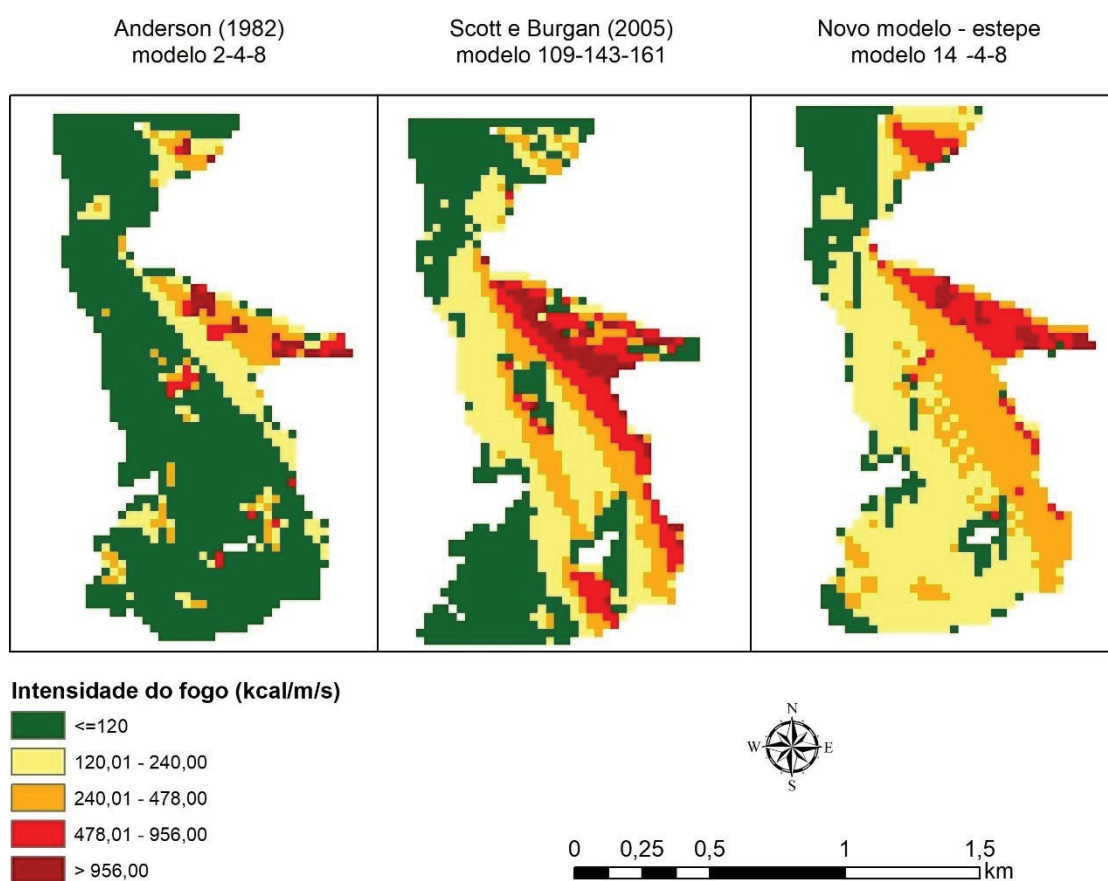
\* indica diferença estatística significativa; letras diferentes indicam diferença estatística significativa

Em simulações para áreas campestres foram observados valores de 0,7 (CARAPIÁ, 2006) a 9,2 metros Reyes (2017). Em observações em campo esta variável apresentou valores de 1,26 (SEGER *et al.*, 2013) a 3,81 metros

(GANASSOLI NETO, 2019), enquanto para áreas de capoeira, Fernandes (2003) indicou comprimento de chama simulado de 3,4 metros.

Relacionada ao comprimento de chama, a intensidade da linha do fogo é indicada por Rothermel e Deeming (1980) para prognosticar os efeitos do fogo com base nos gases liberados acima das chamas. Na Figura 46 está representada a espacialização de acordo com a intensidade da linha de fogo simulada para área de estudo, que estão classificadas em cinco categorias segundo Govender, Trollope e Van Wilgen (2006), de baixa ( $\leq 120 \text{ kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) a extrema ( $> 956,00 \text{ kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ).

FIGURA 46 – ESPACIALIZAÇÃO DA INTENSIDADE DA LINHA DE FOGO ( $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS



FONTE: A autora (2020).

Os modelos abrangeram todas as cinco classes de intensidade pré-definidas. A representatividade em cada classe está apresentada na Tabela 26.

TABELA 26 – REPRESENTATIVIDADE DE ÁREA SIMULADA POR CLASSE DE INTENSIDADE DA LINHA DE FOGO ( $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS

Classes	Intensidade do fogo ( $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ )	Modelos de combustíveis					
		2-4-8		109-143-161		14-4-8	
		Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Baixo	$\leq 120,00$	87,8	73,8	46,0	38,5	24,0	19,9
Moderado	120,01 - 240,00	16,2	13,6	34,5	28,9	52,8	44,0
Alto	240,01 - 478,00	10,0	8,4	20,5	17,2	31,7	26,4
Muito alto	478,01 - 956,00	2,6	2,2	12,2	10,2	9,2	7,6
Extremo	$> 956,00$	2,4	2,0	6,2	5,2	2,5	2,1
Total		119,0	100,0	119,4	100,0	120,1	100,0

FONTE: A autora (2020).

O modelo 2-4-8 concentrou 73,8% da área total na classe baixo, seguido da classe moderado. A intensidade da linha de fogo média obtida foi de  $137,24 \text{ kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , menor valor dentre os modelos e indicou diferença estatística significativa em relação aos outros dois (TABELA 27).

TABELA 27 – MÉDIAS DE INTENSIDADE DA LINHA DE FOGO ( $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) PARA OS MODELOS

Modelos	N	Intensidade de fogo ( $\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ )
2-4-8	1278	137,24 <sup>a</sup>
14-4-8	1299	261,09 <sup>b</sup>
109-143-161	1286	274,69 <sup>b</sup>

Contraste	Sig.	Diferença	+/- Limites
109-143-161 - 14-4-8		-13,6046	23,3005
109-143-161 - 2-4-8	*	137,459	23,3956
14-4-8 - 2-4-8	*	123,854	23,3372

FONTE: A autora (2020).

NOTA: Método 95,0% LSD

\* indica diferença estatística significativa; letras diferentes indicam diferença estatística significativa

O modelo 109-143-161 por sua vez obteve a maior média quando comparado aos demais,  $274,69 \text{ kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , também com destaque para as classes baixo (38,5%) e moderado (28,9%), ao passo que o modelo 14-4-8 concentrou-se nas classes moderado (44%) e alto (26,4%), com intensidade da linha de fogo média de  $261,09 \text{ kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ . Este último vai de encontro ao observado por Seger *et al.* (2013), em queimas realizadas para estepe *stricto*

*sensu* pós-inverno, sendo de 210,3 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> o valor médio obtido, porém os autores evidenciam a oscilação de valores presentes na literatura para intensidade em tipologia de campos.

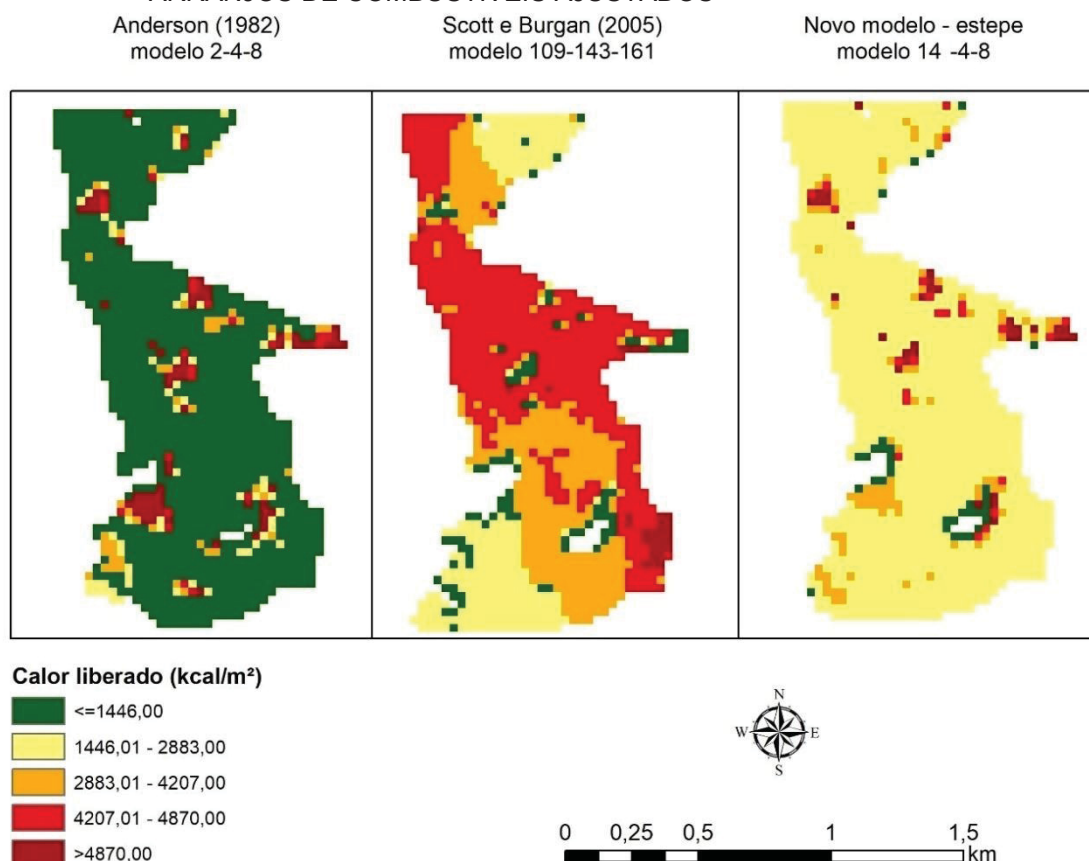
Em outros estudos *in loco* foram descritos valores inferiores às médias simuladas, 136,6 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> (SCHMIDT *et al.*, 2017), assim como superiores. Ganassoli Neto (2019) observou valor médio de 1.155,2 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> em queimas realizadas em setembro, para tipologia campestre com 4 anos sem queima; enquanto Silva (2018) observou uma intensidade média de 528,6 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> (campestre) e 525,3 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> (savanas).

Carapiá (2006) observou, para simulações em áreas de gramíneas, uma variação da intensidade de 31 até 2.808,58 kcal.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>. A autora demonstra a influência da velocidade do vento sobre a intensidade da linha de fogo, em que uma variação de 5 m.s<sup>-1</sup> na velocidade do vento pode dobrar a área queimada e a intensidade do fogo, quando comparados com vento em calmaria (<0,5 m.s<sup>-1</sup>).

Na Figura 47 está representada a espacialização de acordo com o calor liberado por unidade de área (kcal.m<sup>-2</sup>) simulado, que estão classificadas em cinco categorias, de baixa ( $\leq 1.446$  kcal.m<sup>-2</sup>) a extrema ( $> 4.870$  kcal.m<sup>-2</sup>), de modo a coincidir com o estabelecido por McArthur (1973) e Govender, Trollope e Van Wilgen (2006).

Rothermel e Deeming (1980) indicam o uso calor liberado por unidade de área para estimar o calor direcionado a superfície e relacioná-lo com os efeitos gerados no solo e na camada superficial, porém Kelley (2009) ressalva que o uso de valores de intensidade de fogo para descrever os efeitos de fogo é inadequado.

FIGURA 47 – ESPACIALIZAÇÃO DO CALOR LIBERADO POR ÁREA (kcal.m<sup>-2</sup>) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS



FONTE: A autora (2020).

A representatividade de área atingida conforme as classes de calor liberado por área (kcal.m<sup>-2</sup>) está apresentada na Tabela 28. Os modelos apresentaram comportamento de distribuição por classe distintos entre si, assim como diferença estatística significativa para os valores de calor liberado por unidade de área simulados, para os quais as médias estão apresentadas na Tabela 29.

TABELA 28 – REPRESENTATIVIDADE DE ÁREA SIMULADA POR CLASSE DE CALOR LIBERADO POR UNIDADE DE ÁREA (kcal.m<sup>-2</sup>) PARA TRÊS ARRANJOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS

Classes	Calor liberado (kcal.m <sup>-2</sup> )	Modelos de combustíveis					
		2-4-8		109-143-161		14-4-8	
		Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Baixo	<=1.446,00	100,7	84,6	8,6	7,2	2,9	2,4
Moderado	1.446,01 – 2.883,00	5,7	4,8	23,6	19,8	104,3	86,8
Alto	2.883,01 – 4.207,00	4,3	3,6	33,9	28,4	7,7	6,4
Muito alto	4.207,01 – 4.870,00	2,0	1,7	50,6	42,4	2,1	1,8
Extremo	> 4.870,00	6,3	5,3	2,7	2,2	3,1	2,6
Total		119,0	100,0	119,4	100,0	120,1	100,0

FONTE: A autora (2020).



O modelo 2-4-8 apresentou maior concentração na classe baixo (84,6%), com a mínima obtida de 411,9 kcal.m<sup>-2</sup>, seguido da classe extremo (5,3%), com valor máximo de 6763,9 kcal.m<sup>-2</sup>, sendo 1566,5 kcal.m<sup>-2</sup> o calor médio liberado. Para o modelo 109-143-161, observou-se a maior representatividade na classe muito alto (42,4%) e alto (28,4%). Os valores simulados variaram de 186,5 a 5099,71 kcal.m<sup>-2</sup> e indicaram um valor médio de 3589,44 kcal.m<sup>-2</sup>, o mais elevado entre os modelos. O modelo 14-4-8 teve 86,8% da área total na classe moderado, com um valor médio de calor liberado de 2495,5 kcal.m<sup>-2</sup>, com uma variabilidade de 408,2 a 6162,5 kcal.m<sup>-2</sup>.

TABELA 29 – MÉDIAS DE CALOR LIBERADO (kcal.m<sup>-2</sup>) PARA OS MODELOS

Modelos			N	Calor liberado (kcal.m <sup>-2</sup> )	
2-4-8			1278	1566,47	<sup>a</sup>
14-4-8			1299	2495,50	<sup>b</sup>
109-143-161			1286	3589,44	<sup>c</sup>

Contraste				Sig.	Diferença	+/- Limites
109-143-161	-	14-4-8		*	-1093,94	82,0362
109-143-161	-	2-4-8		*	2022,97	82,3709
14-4-8	-	2-4-8		*	929,028	82,1652

FONTE: A autora (2020).

NOTA: Método 95,0% LSD

\* indica diferença estatística significativa; letras diferentes indicam diferença estatística significativa

Cruz *et al.* (2015) observaram que o grau de cura do combustível afeta a velocidade de propagação do fogo, sendo que o conteúdo geral de umidade do combustível está significativamente relacionado à redução da velocidade de propagação do fogo, em vez de apenas o teor de umidade do combustível vivo. Quanto a isso, Rossa e Fernandes (2018) descrevem que o efeito do conteúdo de umidade do material vivo não é facilmente detectado pela análise estatística, podendo ser prejudicado pela influência dominante do vento na velocidade de propagação do fogo e por correlações intrínsecas entre as métricas de combustível (como altura do leito, carga e densidade), que diluem o seu efeito. No entanto, nota-se que a modelagem de velocidade de propagação por meio do conteúdo de umidade geral dos combustíveis produz resultados aceitáveis e que desconsiderar o efeito do teor de umidade dos combustíveis vivos pode subprever este parâmetro em condições de seca.

Neste contexto, os modelos herbáceos de Scott e Burgan (2005) são caracterizados como dinâmicos, pois consistem em variar a quantidade de material combustível vivo e morto em função do conteúdo do material herbáceo vivo; diferente dos modelos de Anderson (1982), que foram formulados para períodos severos de temporadas de incêndios e são classificados como estáticos. Logo, quando houver carga de material herbáceo vivo, esta permanecerá intacta independente de seu teor de umidade. A categorização para modelos combustíveis dinâmicos resulta em mudanças significativas no processo de comportamento de fogo (SCOTT; BURGAN, 2005).

Amaral (2017) afirma que calor liberado por unidade área é inversamente proporcional a velocidade de propagação, que também influi na quantidade de material combustível consumido durante a queima. O autor também observou que a carga de material combustível eleva o consumo de biomassa, em razão da velocidade de propagação. Silva (2018) também observou correlação positiva entre o calor liberado e a carga de combustível fino, tanto para áreas-campestres, como também para savanas.

Pode-se observar que o modelo 109-143-161 apresenta originalmente elevada carga de material herbáceo vivo ( $20 \text{ Mg.ha}^{-1}$ ), com umidade de extinção a 40%. Tendo em vista que este modelo é dinâmico, ao considerar um conteúdo de umidade de 100% para o material herbáceo vivo, a carga de material combustível morto passa a ser de aproximadamente de  $10,3 \text{ Mg.ha}^{-1}$ .

Similar ao modelo 109-143-161, Seger *et al.* (2013) descreveram um valor médio de  $4.067,19 \text{ kcal.m}^{-2}$  para vegetação de estepe, para a qual os autores observaram um percentual de cura de 85%, com teor de umidade de 48%, enquanto o material vivo apresentou um teor de umidade de 127%, entretanto para os modelos simulados foram atribuídos valores de 26 e 100% de conteúdo de umidade, respectivamente.

O modelo 2-4-8, com umidade de extinção a 14%, tem carga total de combustível similar ao modelo 14-4-8, porém a quantidade de combustível na classe de fino morto deste último é superior, além deste conter carga de combustível herbáceo vivo e se comportar como modelo dinâmico. Observou-se que os valores médios de calor liberado observados para o cerrado em queimas controladas de  $1.904,5$  a  $2.698,4 \text{ kcal.m}^{-2}$ , de acordo com Ganassoli Neto (2019),

e de 2.196,94 kcal.m<sup>-2</sup>, de acordo com Silva (2018), se aproximaram da média obtida para este último modelo.

#### 5.4 SEVERIDADE DO INCÊNDIO FLORESTAL

A severidade do incêndio florestal relacionado com o registro fotográfico está apresentada na Figura 48.

FIGURA 48 – SEVERIDADE DO INCÊNDIO FLORESTAL, POR *RELATIVIZED BURN RATIO* (RBR)

continua

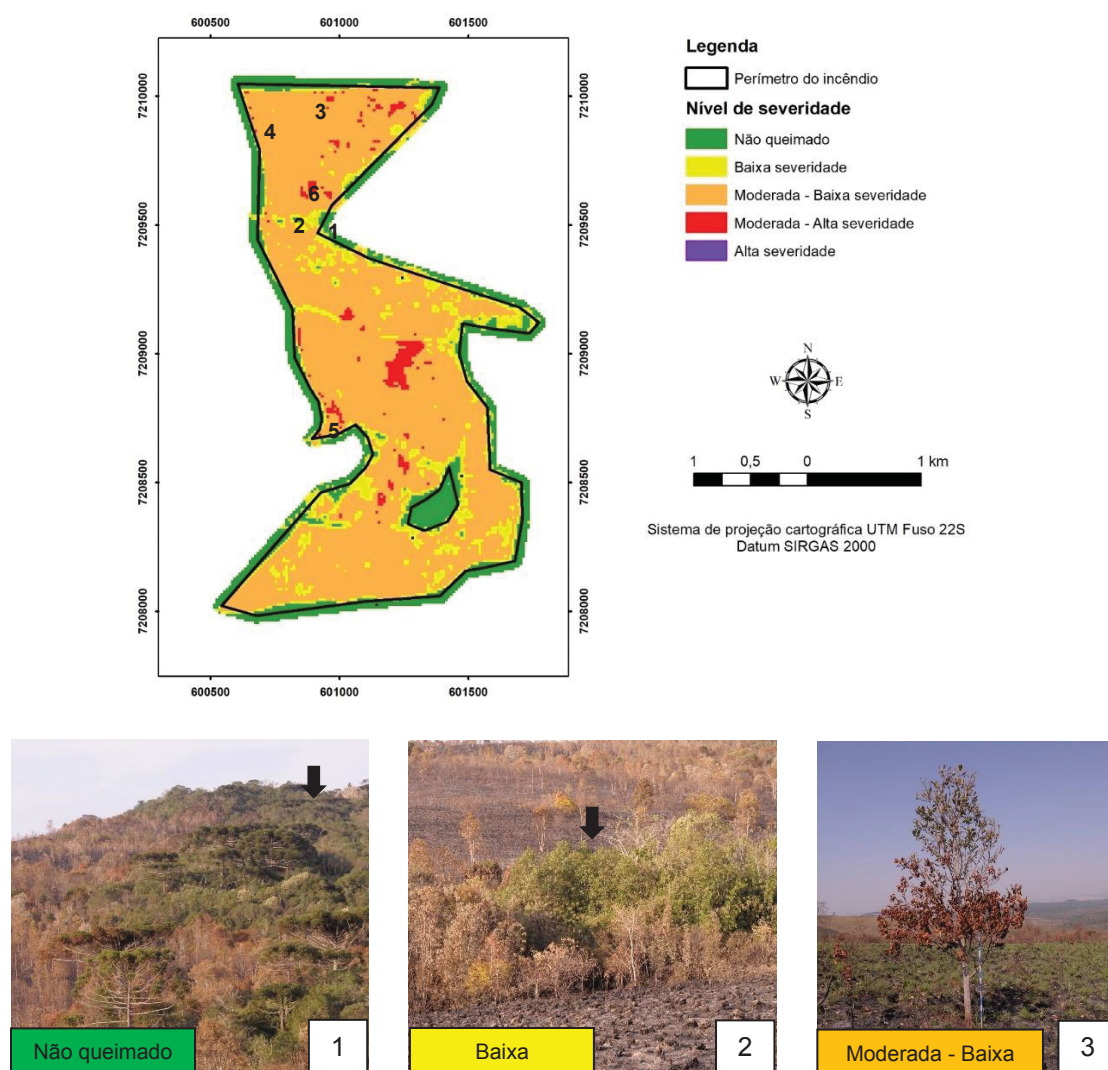


FIGURA 48 – SEVERIDADE DO INCÊNDIO FLORESTAL, POR *RELATIVIZED BURN RATIO* (RBR)

conclusão



FONTE: A autora (2020).

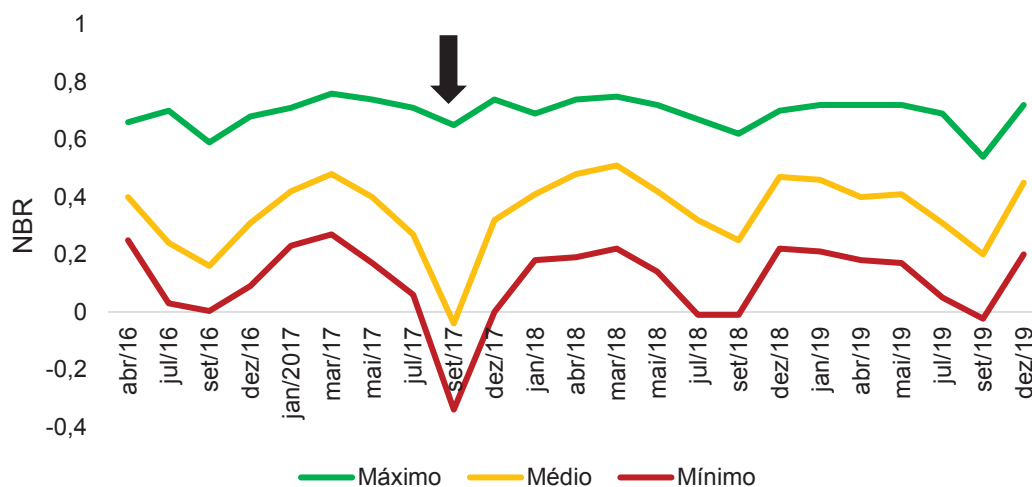
No presente estudo o valor do índice RBR (*Relativized Burn Ratio*) variou de 0,2 a 0,5. De acordo com a classificação realizada, 78,7% da área atingida pelo incêndio prevaleceu na classe moderado-baixo, seguida de baixa (13,1%) e moderada-alta (2,6), os demais 5,6% foram categorizados como não queimado. O observado foi de encontro com o descrito por Trindade e Iarmul (2018) para o mesmo evento.

Keeley (2009) descreve que diversos trabalhos de severidade de fogo utilizaram observações de mudança de matéria orgânica de vegetação e de solo, e que demonstram estar correlacionados com medidas de intensidade de fogo. Entretanto, o autor aponta que apesar da intensidade da linha de fogo ser a mais comumente utilizada, alguns efeitos do fogo estão ligados a diferentes métricas de intensidade, como por exemplo o consumo de combustível superficial que se relaciona com temperaturas na superfície do solo e a duração do aquecimento.

O calor liberado médio simulado para região foi de 2.495,5 kcal.m<sup>-2</sup> (modelo 14), enquanto nos experimentos em campo o calor liberado médio foi de 2.197,81 kcal.m<sup>-2</sup>. O consumo observado para queimas a favor do vento foi de aproximadamente 72% para material herbáceo, enquanto em subparcelas localizadas na área do incêndio, o percentual observado foi de 78%.

Por meio do cálculo do índice *Normalized Burn Ratio* (NBR) foi possível analisar a evolução de regeneração de biomassa herbácea da área atingida pelo incêndio (FIGURA 49). Segundo Alves *et al.* (2018), tanto o índice espectral NBR quanto o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) são sensíveis ao efeito de queima, permitindo uma análise multitemporal.

FIGURA 49 - ANÁLISE MULTITEMPORAL DE VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS E MÍNIMOS DE NBR PARA ÁREA DE INCÊNDIO EM ESTEPE DO PEVV



FONTE: elaborado pela Autora (2020).

NOTA: Seta em preto indica ocorrência de incêndios em setembro de 2017

Anteriormente ao distúrbio observou-se uma oscilação nos valores de NBR, em que os inferiores ocorreram dentre os meses de julho a setembro (média de 0,16) e os superiores dentre janeiro a abril (média de 0,4). Conforme Alves *et al.* (2018), esta variabilidade retrata o comportamento fenológico da formação vegetal predominante, neste caso campestre. Segundo Silva (2014), a ascensão inicial de vigor em áreas de estepe do PEVV se dá em dezembro e estende-se até fevereiro (temporada chuvosa), com declínio nos meses de junho e julho (temporada seca).

O comportamento de NBR pós-incêndio foi similar ao observado pré-incêndio. Com base nos valores médios, foram analisados os picos anuais a fim de auxiliar na interpretação dos efeitos do fogo observados na abordagem gráfica (TABELA 30).

TABELA 30 – MEDIDAS ASSOCIADAS AOS VALORES MÉDIOS DE NBR

	Medida	Ano pré-fogo	Ano do incêndio	+ 1 ano	+ 2 ano
NBR	MAX	0,3951	0,4829	0,5193	0,4611
	MIN	0,1628	-0,0436	0,2481	0,2045
	DIF	<b>0,2323</b>	<b>0,5265</b>	<b>0,2712</b>	<b>0,2566</b>

FONTE: A autora (2020).

O valor mínimo de NBR para o ano do incêndio (em 2017) foi de -0,0436, similar ao descrito por Trindade e Iarmul (2018), de -0,06. A diferença dos valores de NBR máximo e mínimo para esse ano foi de 0,5265, similar ao observado por Alves *et al.* (2018) para região do Enclave de Cerrado dos Campos Amazônicos (ECCA), de 0,514. Segundo os autores, o ano de ocorrência de fogo registra um descenso abrupto no valor de NBR.

Nos dois anos seguintes ao incêndio do PEVV, os valores da diferença de NBR foram similares ao observado anteriormente ao evento. Todavia, Alves *et al.* (2018), observaram que os efeitos do fogo no ECCA, foram consideravelmente reduzidos para dois anos seguintes a sua ocorrência e que, a partir do terceiro ano, houve uma semelhança aos valores médios de NBR observados antes da passagem do fogo.

A fim de corroborar com esta análise, foi realizada a caracterização em campo de material combustível, sendo a caracterização de material combustível pré-incêndio descrita por Rodrigues (2018) (TABELA 31).

TABELA 31 – VALOR MÉDIO DE NBR CORRESPONDENTE AO PERÍODO DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMBUSTÍVEL HERBÁCEO

Período de coleta	NBR médio	Material combustível fino (seco, Mg.ha <sup>-1</sup> )			
		Vivo	Morto	Miscelânea	Total
Mar/Abr de 2016	0,3951	2,32	7,00	3,74	13,06
Jun/Jul de 2016	0,2393	1,41	6,68	4,30	12,39
Outubro de 2016	0,1628	1,38	6,86	4,30	12,53
Setembro de 2017	-0,0436	0,00	0,00	0,00	0,00
Novembro de 2017	0,3233	2,28	0,00	0,12	2,40
Fev/Mar de 2018	0,5193	3,41	1,34	0,45	5,20
Jun/Jul de 2018	0,3207	2,41	2,55	0,47	5,43
Set/Out de 2018	0,2481	2,98	2,39	0,65	6,02
Mar/Abr de 2019	0,4090	3,07	3,42	1,31	7,80

FONTE: A autora (2020).

A suficiência de amostragem foi atingida e está apresentada no Apêndice 5. O valor médio de NBR apresentou correlação positiva com a carga de material combustível vivo ( $r = 0,8$ ).

A carga total de combustível apresentou comportamento crescente nos 19 meses após a ocorrência do incêndio, porém, ao final deste período, o valor foi inferior quando comparado aos dados anteriores, descritos por Rodrigues (2018). Esse comportamento também foi verificado para a carga de material combustível morto. Segundo Alves *et al.* (2018) e Batista *et al.* (2018) áreas com



tempo mais elevado sem queima tendem a acumular biomassa morta, como apontado por Rodrigues (2018) para o PEVV.

Após 19 meses do incêndio pode se observar uma semelhança para com os valores de NBR anteriores, em que valores médios para março/abril pré e pós-incêndios foram de 0,3951 e 0,4090, respectivamente. Alves *et al.* (2018), sugerem uma redução dos efeitos do fogo, recuperação dos níveis de vigor vegetal. Os autores atentaram-se ainda para a fração de cobertura em relação a solos expostos, sendo de 40% para áreas afetadas há 2 meses pelo fogo e 63% para áreas afetadas há dois anos, indicando assim, uma recuperação da continuidade horizontal do combustível.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- i. Os meses críticos de ocorrência de incêndios foram agosto e setembro;
- ii. Houve concentração das ocorrências de incêndios nas classes de tamanho III e IV, indicando ineficiência do sistema de combate;
- iii. A maior ocorrência se deu em estepe *stricto sensu*, que configurou um mosaico de queimas com tempo de retorno de fogo predominantemente misto;
- iv. A técnica de queima contra o vento apresentou parâmetros de comportamento de fogo compatíveis a outros estudos similares, sendo indicada para realização de queimas controladas em áreas campestres;
- v. Após 19 meses da realização das queimas, não houve estabilização da carga total de material combustível.
- vi. Os modelos combustíveis campestres testados contidos no FlamMap foram considerados inadequados para a representação da estepe *stricto sensu* do PEVV; por outro lado, o modelo proposto no presente trabalho apresentou resultados satisfatórios;
- vii. O índice *Relativized Burn Ratio* (RBR) representou de forma adequada a severidade de incêndio em estepe *stricto sensu*;
- viii. O índice espectral *Normalized Burn Ratio* (NBR) foi sensível ao efeito de queima em área de estepe do Parque Estadual de Vila Velha.

Para desenvolvimento futuro, sugere-se a análise de incremento de biomassa, da fração de cobertura da vegetação, dos efeitos sobre a vegetação e solo de distintos intervalos de tempo de queima, assim como diferentes períodos (precoce, modal, tardia), com período de observação superior a dois anos. Recomenda-se também a elaboração de modelos de combustível próprios para as áreas de campos sulinos, assim como para campo cerrado, incluindo a determinação de poder calorífico e superfície área-volume, visando o uso destes em simuladores de propagação de fogo.

## REFERÊNCIAS

- ACCATINO, F.; MICHELE, C. de. Humid savanna–forest dynamics: a matrix model with vegetation–fire interactions and seasonality. **Ecological Modelling**, v. 265, p. 170 - 179, 2013.
- ADÁMEK, M.; JANKOVSKÁ, Z.; HADINCOVÁ, V.; KULA, E.; WILD, J. Drivers of forest fire occurrence in the cultural landscape of Central Europe. **Landscape Ecology**, v. 33, n. 11, p. 2031 - 2045, 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Hidroweb**: sistema de informações hidrológicas, 2017.
- ALBINI, F. A. **Spot fire distance from burning trees** – a predictive model. Ogden: United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and range experiment station, 1979. 80p. (General Technical report INT-56).
- ALVARADO, S. T.; FORNAZARI, T.; CÓSTOLA, A.; MORELLATO, L. P. C.; SILVA, T. S. F. Drivers of fire occurrence in a mountainous Brazilian cerrado savana: tracking long-term fire regimes using remote sensing. **Ecological Indicators**, v. 78, p. 270 - 281, 2017.
- ALVES, D. B.; PÉREZ-CABELLO, F.; CAMBRAIA, B. C.; BONADEU, F.; SILVEIRA, A. L. P. Análise multitemporal de áreas afetadas pelo fogo no enclave de cerrado do Parque Nacional dos Campos Amazônicos utilizando sensoriamento remoto e trabalho de campo. **Geografia, Ensino & Pesquisa**, v. 22, e18, 2018.
- ALVES, M. V. G.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V.; KOEHLER, H. S.; PEREIRA, J. F. Modelagem de umidade do material combustível baseada em variáveis meteorológicas. **Floresta**, v. 39, n. 1, p. 167 - 174, 2009.
- AMARAL, S. S. **Condições que potencializam a propagação de incêndios florestais e a emissão de poluentes gasosos para a atmosfera**. 286f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2017.
- ANDERSON, H. E. **Aids to determining fuel models for estimating fire behavior**. Ogden: United States Department of Agriculture, Forest Service, 1982, 28p. (General Technical Report INT-122).
- ANDRADE, E. S. **Zoneamento de risco de incêndios florestais para o Parque Estadual do Guartelá, Tibagi (PR)**. 10f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ANDREWS, P. L. Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. **International Journal of Wildland Fire**, v. 23, p. 21 - 33, 2014.

BATISTA, A. C.; BEUTLING, A.; PEREIRA, J. F. Estimativa do comportamento do fogo em queimas experimentais sob povoamento de *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p. 779 - 787, 2013.

BATISTA, E. K. L.; RUSSEL-SMITH, L.; FRANÇA, H.; FIGUEIRA, J. E. C. An evaluation of contemporary savanna fire regimes in the Canastra National Park, Brazil: outcomes of fire suppression policies. **Journal of Environmental Management**, n. 205, p. 40 - 49, 2018.

BATISTA, R. L. M. **Estepe *stricto sensu***. 2017, 1 fotografia, color.

BEHLING, H. Late Quaternary vegetation, climate and fire history of the *Araucaria* forest and campos region from Serra Campos Gerais, Paraná State (South Brazil). **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 97, p. 109 - 121, 1997.

BEHLING, H.; PILLAR, V. D. Late Quaternary vegetation, biodiversity and fire dynamics on the Southern Brazilian highland and their implication for conservation and management of modern *Araucaria* forest and grassland ecosystems. **Philos T Roy Soc B**, v. 362, n. 1478, p. 243 - 251, 2007.

BENICIO, R. B. de.; STOŠIĆ, T.; FIGUEIRÊDO, P. H. de; STOŠIĆ, B. D. Multifractal behavior of wildland and forest fire times series in Brazil. **Physica A**, v. 392, p. 6367 - 6374, 2013.

BEUTLING, A.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V.; VITORINO, M. D. Quantificação de material combustível superficial em reflorestamento de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. **Floresta**, Curitiba, v. 35, n. 3, p.465 - 472, 2005.

BEUTLING, A.; BATISTA, A. C.; STOLLE, L.; TETTO, A. F.; ALVES, M. V. G. Caracterização e modelagem de material combustível superficial em povoamento de *Pinus elliotti*. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 3, p. 443 - 452, 2012.

BILBAO, B.; MISTRY, J.; MILLÁN, A.; BERARDI, A. Sharing multiple perspectives on burning: towards a participatory and intercultural fire management policy in Venezuela, Brazil and Guyana. **Fire**, v. 39, n. 2, 2019.

BOND, W. J.; KEANE, R. E. Fire, ecological effects of. **Reference Module in Life Sciences**, 2017. 11 p.

BOND, W. J.; KEELEY, J. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution os flammable ecosystems. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 20, n. 7, p. 387 - 394, 2005.

BONTEMPO, G. C.; LIMA, G. S.; RIBEIRO, G. A.; DOULA, S. M.; SILVA, E.; JACOVINE, L. A. G. Registro de ocorrência de incêndios (ROI): evolução, desafios e recomendações. **Biodiversidade Brasileira**, Brasília, n. 2, p. 247 - 263, 2011.

BOTELLA-MARTÍNEZ, M. A.; FERNÁNDEZ-MANSO, A. Estudio de la severidade post-incendio em la Comunidad Valenciana comparando los índices dNBR, RdNBR y RBR a partir de imágenes Landsat 8. **Revista de Teledetección**, v. 49, p. 33 - 47, 2017.

BOWMAN, D. M. J. S.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A.; D'ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUK, M. A.; KULL, A. C.; MARSTON, J. B.; MORITZ, M. A.; PRENTICE, I. C.; ROOS, C. I.; SCOTT, A. C.; SWETNAM, T. W.; WERF, G. R.; PYNE, S. J. Fire in the Earth System. **Science**, v. 324, p. 481 - 484, 2009.

BOWMAN, D. M. J. S.; BALCH, J.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; COCHRANE, M. A.; D'ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUK, M. A.; KULL, C. A.; MACK, M.; MORITZ, M. A.; PYNE, S.; ROOS, C. I.; SCOTT, A. C.; SODHI, N. S.; SWETNAM, T. W. The human dimension of fire regimes on Earth. **Journal of Biogeography**, v. 38, p. 2223 - 2236, 2011.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de lei nº 11276 de 27 de dezembro de 2018**. Autor: Poder Executivo. Câmara dos Deputados, Brasília, DF, 27 dez. 2018. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2190265>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

BRASIL. Lei nº 9985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 19 jul. 2000.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 25 mai. 2012. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm)>. Acesso em: 6 jan. 2020.

BROWN, J. K.; OBERHEU, R. D.; JOHNSTON, C. M. **Handbook inventorying surface fuels and biomass in the interior West**. Ogden, 1981, 48 p. Disponível em: <[https://www.fs.fed.us/rm/pubs\\_int/int\\_gtr129.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr129.pdf)>. Acesso em: 12 set. 2019.

BYRAM, G. M. Combustion of forest fuels. In: DAVIS, K. P. **Forest fire: control and use**. New York: Mc Graw Hill, 1959.

CAMARGOS, V. L.; RIBEIRO, G. A.; SILVA, A. F.; MARTINS, S. V.; CARMO, F. M. S. Estudo do comportamento do fogo em um trecho de floresta estacional semidecídua no município de Viçosa, Minas Gerais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 537 - 545, 2015.

CAMPOS, J. B.; DALCOMUNE, M. A. O Parque Estadual de Vila Velha. In: CARPANEZZI, O. T. B.; CAMPOS, J. B. (Org.). **Coletânea de pesquisas: Parques Estaduais de Vila Velha, Cerrado e Guartelá**. Curitiba: IAP, 2011. p. 15 - 22.

CAPANEZZI, O. T. B.; CAMPOS, J. B. **Coletânea de pesquisas: Parques Estaduais de Vila Velha, Cerrado e Guartelá**. Curitiba: IAP, 2011.

CARAPIÁ, V. R. **Predição do índice de risco de incêndio e modelagem computacional do comportamento do avanço da frente do fogo no Parque Nacional da Floresta da Tijuca**. 197 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

CARDOSO, L. E.; CRISPIM, A. M. A.; RODRIGUES, C. A. G.; BARIONI JUNIOR, W. Efeito da queima na dinâmica da biomassa aérea de um campo nativo no Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 6, p. 747 - 752, 2003.

CARDOSO, L. E.; CRISPIM, A. M. A.; RODRIGUES, C. A. G.; BARIONI JUNIOR, W. Composição e dinâmica da biomassa aérea após a queima em savana gramíneo-lenhosa no Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 11, p. 2309 - 2316, 2000.

CERVI, A. C.; VON LINSINGEN, L.; HATSCHBACH, G.; RIBAS, O. S. A vegetação do Parque Estadual de Vila Velha, município de Ponta Grossa, Paraná, Brasil. **Boletim do Museu Botânico Municipal**, Curitiba, v. 69, p.1 - 52, 2007.

CHENNEY, N. P.; GOULD, J. S.; CATCHPOLE, W. R. Prediction of fire spread in grasslands. **International Journal Wildland Fire**, v. 8, n. 1, p. 1 - 13, 1998.

COUNTRYMAN, C. M. Moisture in living fuels affects fire behavior. **Fire Management**, v. 35, p. 10 - 14, 1974.

COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of Brazilian Cerrado. In: GOLDAMMER J.G. (eds). **Fire in the tropical biota**, v. 84, p. 82 - 105, 1990.

CRUZ, M. G.; GOULD, J. S.; KIDNIE, S.; BESSELL, R.; NICHOLS, D.; SLIJEPCEVIC, A. Effects of curing on grassfires: II. Effect of grass senescence on the rate of fire spread. **International Journal of Wildland Fire**, v. 24, p. 838 - 848, 2015.

DALAZOANA, K. **Espacialização dos campos nativos na Escarpa Devoniana do Parque Nacional dos Campos Gerais, PR**. 145f. Dissertação



(Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2010.

DELGADO, F. G.; FABABÚ, D. D.; AZCÁRATE, J. C. **Manejo del fuego**, s.d. 50p.

DIAS, B. B. Agronegócio nos Campos Gerais do Paraná: impactos do cooperativismo holandês no espaço rural. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GEOGRAFIA AGRÁRIA, 8., 2017. Curitiba. **Anais do SINGA**, 2017.

DIMITRAKOPOULOS, A. P.; BEMMERZOUK, A. M. Predicting live herbaceous moisture content from a seasonal drought index. **International Journal of Biometeorology**, v. 47, p. 73 – 79, 2003.

DUFF, T. J.; BESSEL, R.; CRUZ, M. G. Grass curing/cured fuels. In: MANZELLO, S. L. (Ed). **Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires**. Springer, 2019.

DURIGAN, G.; RATTER, J. A. The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. **Journal of Applied Ecology**, v. 53, n.1, p. 11 - 15, 2016.

ELOY, L.; HECHT, S.; STEWARD, A.; MISTRY, J. Firing up: policy, politics and polemics under new and old burning regimes. **The Geographical Journal**, v. 185, p. 2 - 9, 2019.

FALLEIRO, R. M.; SANTANA, M. T.; BERNI, C. R. As contribuições do manejo integrado do fogo para o controle dos incêndios florestais nas terras indígenas do Brasil. **Biodiversidade Brasileira**, v. 6, n. 2, p. 88 - 105, 2016.

FERNANDES, F. Paleontologia do devoniano nos Campos Gerais do Paraná: contribuições de uma prática de campo para o ensino de geociências na educação básica. **Geosaberes**, Fortaleza, v. 2, n. 4, p. 100 – 112, 2011.

FERNANDES, G. D. A. **Simulação de incêndio florestal no Parque Estadual Serra do Rola-Moça, Minas Gerais, utilizando o Farsite™**. 110 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2003.

FERNANDES, P.; BOTELHO, H.; LOUREIRO, C. **Manual de formação para a técnica do fogo controlado**. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2002. 144p.

FIDELIS, A.; ALVARADO, S. T.; BARRADAS, A. C.S.; PIVELLO, V. R. The year 2017: megafires and management in the Cerrado. **Fire**, v. 49, n. 1, 2018.

FIDELIS, A.; DELGADO-CARTAY, M. D.; BLANCO, C. C.; MÜLLER, C. S.; PILLAR, V. D.; PFADENHAUER, J. Fire intensity and severity in brazilian campos grassland. **Interciencia**, Caracas, v. 35, n. 10, p. 739 - 745, 2010.

FIDELIS, A.; PIVELLO, V. R. Deve-se usar o fogo como instrumento de manejo no Cerrado e Campos sulinos? **Biodiversidade Brasileira**, v. 2, n. 1, p. 12-25, 2011.

FINNEY, M. A. **FARSITE**: Fire Area Simulator—model development and evaluation. Ogden: United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2004. 52p. (Research Paper RMRS-RP-4 Revised).

FIRELAB. **FlamMap program**. United State Departament of Agriculture, U.S. Forest Service, 2019. Disponível em: <<https://www.firelab.org/project/flammap>>. Acesso em: 5 set. 2019.

FONTOURA, L. M.; MEDEIROS, R. J.; ADAMS, L. W. Turismo, pressões e ameaças para a conservação da biodiversidade em parques nacionais do Brasil e Estados Unidos. **Cultur**, v. 10, n. 1, p. 35 – 53, 2016.

GANASSOLI NETO, E. **Comportamento do fogo em área de savana na Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins**. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2019.

GARVEY, M.; MILLIE, S. **Grassland curing guide**. Country Fire Authority (CFA), Community Safety Department. Melbourne, 2000, 40 p.

GLASSPOOL, I. J.; SCOTT, A. C.; WALTHAM, D.; PRONINA, N.; SHAO, L. The impact of fire Late Paleozoic Earth system. **Front Plant Sci.**, v. 6, n. 756, 2015.

GOMES, L.; MIRANDA, H. S.; BUSTAMANTE, M. M. C. How can we advance the knowledge on the behavior and effects of fire in the Cerrado biome?. **Forest Ecology and Management**, v. 417, p. 281 - 290, 2018.

GOVENDER, N.; TROLLOPE, W. S. W.; VAN WILGEN, B. W. The effect of fire season, fire frequency, rainfall and management on fire intensity in savana vegetation in South Africa. **Journal of Applied Ecology**, v. 43, p. 748 - 758, 2006.

GORGONE-BARBOSA, E.; PIVELLO, V. R.; BAUTISTA, S.; ZUPO, T.; RISSI, M. N.; FIDELIS, A. How can an invasive grass affect fire behavior in a tropical savanna? A community and individual plant level approach. **Biological Invasions**, v. 17. p. 423 - 431, 2015.

GRIEBELER, A. M.; TURCHETTO, F.; RORATO, D. G.; SCHUMACHER, M. V.; FACCO, A. T.; PORAZZI, A. V. Caracterização quali-quantitativa do material combustível e estoque de carbono em vegetação de capoeira, Santa Maria, RS. **Brasilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 11038 - 11046, 2020.

GRIFFIN, G. F.; FRIEDEL, M. H. Effects of fire on central Australian rangelands I: fire and fuel characteristics and changes in herbage and nutrients. **Australian Journal of Ecology**, Carlton, v. 9, n. 4, p. 381 - 393, 1984.

HANTSON, S.; PUEYO, S.; CHUVIECO, E. Global fire size distribution is driven by human impact and climate. **Global Ecology and Biogeography**, v. 24, p. 77 – 86, 2015.

HARDESTY, J.; MYERS, R. FULKS, W. Fire, ecosystems and people: a preliminary assessment of fire as a global conservation issue. **Fire management**, v. 22, n. 4, p. 78 - 87, 2005.

HE, T.; LAMONT, B. B.; PAUSAS, J. G. Fire as a key driver of Earth's biodiversity. **Biological Reviews**, n. 94, p. 1983-2010, 2019.

HOFFMANN, W. A.; JACONIS, S. Y.; MCKINLEY, K. L.; GEIGER, E. L.; GOTSCH, S. G.; FRANCO, A. C. Fuels or microclimate? Understanding the drivers of fire feedbacks at savanna-forest boundaries. **Austral Ecology**, v. 37, n. 6, p. 634 – 643, 2011.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). **Estações meteorológicas**: médias históricas. Londrina: IAPAR, 2019. Disponível em: <[http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias\\_Historicas/Ponta\\_Grossa.htm](http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Ponta_Grossa.htm)>. Acesso em: 15. out. 2019.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP). **Plano de manejo do Parque Estadual de Vila Velha**. Curitiba, 2004. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1255>>. Acesso em: 9 jul. 2019.

\_\_\_\_\_. **IAP Notícias**: IAP participa de curso de atualização sobre manejo com fogo em unidades de conservação. Curitiba: IAP, 2018. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/2018/04/1391/IAP-participade-curso-de-atualizacao-sobre-manejo-com-fogo-em-Unidades-de-Conservacao.html>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. **Unidades de Conservação Estaduais**. Curitiba: IAP, 2012. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1209>>. Acesso em: 27 jun. 2020.

\_\_\_\_\_. **RPPN – Reserva Particular do Patrimônio Natural**. Curitiba: IAP, 2017. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=289>>. Acesso em: 27 jun. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2 ed., revisada e ampliada. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 275 p.

\_\_\_\_\_. **Malhas digitais**. IBGE: Brasília, 2015. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais>>. Acesso em: 9 mai. 2020.

INSTITUTO CHICO MENDES DE BIODIVERSIDADE. **Mapa temático e dados geoestatísticos das unidades de conservação federais**. Brasília: ICMBIO, 2019. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/portal/geoprocessamentos/51-menu-servicos/4004-downloads-mapa-tematico-e-dados-geoestatisticos-das-uc-s>>. Acesso em: 27 jul. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil. São José dos Campos: INPE, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 5 set. 2019.

JESUS, J. B.; ROSA, C. N.; BARRETO, I. D. C.; FERNANDES, M. M. Análise da incidência temporal, especial e de tendência de fogo nos biomas e unidades de conservação do Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 176 – 191, 2020.

JIMÉNEZ-RUANO, A.; MIMBRERO, M. R.; FERNÁNDEZ, J. R. Understanding wildfire in mainland Spain. A comprehensive analysis of fire regime features in a climate-human context. **Applied Geography**, v. 89, p. 100-111, 2017.

JOLLY, W. M.; HADLOW, A. M.; HUGUET, K. De-coupling seasonal changes in water content and dry matter to predict live conifer foliar moisture content. **International Journal of Wildland Fire**, v. 23, p. 480 – 489, 2014.

JOLLY, W. M.; JOHNSON, D. M. Pyro-Ecophysiology: shifting the paradigm of live wildland fuel research. **Fire**, 2018.

KELLEY, J. E. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. **International Journal of Wildland Fire**, v. 18, p. 116 – 126, 2009.

KEY, C. H.; BENSON, N. Landscape assessment: ground measure of severity, the composite burn index; and remote sensing of severity, the normalized burn ratio. In: LUTES, D. C. (Ed.). **FIREMON**: fire effects monitoring and inventory system. Ogden: United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006. 48p. (RMRS-GTR-164-CD).

KNAPP, E. E.; ESTES, B. L.; SKINNER, C. N. **Ecological effects of prescribed fire season**: a literature review and synthesis for managers. Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 2009, 80 p. (Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-224.).

KOVALSYKI, B. **Zoneamento de risco de incêndios florestais para o Parque Estadual de Vila Velha e seu entorno**. 73f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

LIMA, G. S.; TORRES, F. T. P.; COSTA, A. G.; FÉLIX, G. A.; SILVA JÚNIOR, M. R. Avaliação da eficiência de combate aos incêndios florestais em unidades de conservação brasileiras. **Floresta**, Curitiba, v. 48, n. 1, p. 113 – 122, 2018.

LIU, Z.; WIMBERLY, M. C. Climatic and landscape influences on fire regimes from 1984 to 2010 in the Western United States. **PlosOne**, v. 10, n. 10, e0140839, 2015.

MAACK, R. **Geografia física do estado do Paraná**. 4º edição, Editora UEPG, Ponta Grossa, 2012. 526 p.

MARANHO, L. T. **Restauração dos ecossistemas de campos do Parque Estadual de Vila Velha (PEVV), PR, Brasil: manejo com fogo controlado**. Curitiba, 2014. (Projeto de Pesquisa).

McARTHUR, A. G. **Grassland fire danger meter Mk IV**. 1973. Disponível em: < <http://members.iinet.net.au/~barling/grass-behave.html>>. Acesso em: 02 jun. 2020.

McFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425 - 1432, 1996.

MEDEIROS, M. B. de.; FIEDLER, N. C. Incêndios florestais no Parque Nacional da Serra da Canastra: desafios para a conservação da biodiversidade. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 157-168, 2004.

MEIGS, G. W.; KRAWCHUK, M. A. Composition and structure of forest fire refugia: what are the ecosystem legacies across burned landscapes? **Forests**, v. 9, n. 243, f9050243, 2018.

MELO, M. S. **Formas rochosas do Parque Estadual de Vila Velha**. Ponta Grossa: UEPG, 2006. 154 p.

MELO, L. A. A. N. de.; SOARES, R. V.; SIQUEIRA, J. D. P.; KIRCHNER, F. F. Modelagem de combustíveis florestais no Parque Nacional do Iguaçu, PR, Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 3, 2006.

MELO, M. S.; MORO, R. S.; GUIMARÃES, G. B. **Patrimônio Natural dos Campos Gerais do Paraná**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2007, 230p.

MELO, M. S. et al. O Patrimônio Natural dos Campos Gerais e o desenvolvimento sustentável. In: MELO, M. S.; MORO, R. S.; GUIMARÃES, G. B. **Patrimônio Natural dos Campos Gerais do Paraná**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2007, p. 221 - 227.

MÉRIDA, J. C. F. Factores ambientales: factores meteorológicos. In: VÉLEZ, R. M. (Coord.). **La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias**. Madrid: McGRAW-HILL, 2009. p.145 - 149.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Informma: manejo do fogo é tema da BioBrasil**. Brasília: MMA, 2016. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/informma.html>>. Acesso em: 27 jul. 2020.

MISTRY, J.; BERARDI, A. Assessing fire potential in a Brazilian Savanna Nature Reserve. **Biotropica**, v. 37, n. 3, p. 439 - 451, 2005.

MISTRY, J.; SCHMIDT, I. B.; ELOY, L.; BILBAO, B. New perspectives in fire management in South American savanas: the importance of intercultural governance. **Ambio**, v. 48, n. 8, p. 890 - 899, 2019.

MOLINA, D. T. Sistemas de simulación del comportamiento del fuego: FARSITE y FLAMMAP. In: VÉLEZ, R. M. (Coord.). **La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias** (2.ed.). Madrid: McGRAW-HILL, 2009. p. 225 - 231.

MOREIRA, M.S. **Caracterização e modelagem do material combustível de Cerrado Campo Sujo na região do Jalapão**. 96f. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

MORO, R. S.; CARMO, M. R. B. A vegetação campestre nos Campos Gerais. In: MELO, M. S. de; MORO, R. S.; GUIMARÃES, G. B. (Org.) **Patrimônio natural dos Campos Gerais**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2007, p. 49 - 58.

MYERS, R. L. **Convivendo com o fogo: manutenção dos ecossistemas e subsistência com o manejo integrado do fogo**. Tallahassee: TNC, 2006. 28 p.

NELSON, R. F. JR. Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 30, n. 7, p. 1071 – 1087, 2000.

NUNES, J. R. S.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. FMA+ - um novo índice de perigo de incêndios florestais para o Estado do Paraná, Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 1, p. 75 – 91, 2006.

OLIVEIRA, M. B.; MARANHO, L. T. Efeitos do fogo controlado e do roçado sobre a sucessão ecológica da estepe gramíneo-lenhosa no Parque Estadual de Vila Velha, PR, Brasil, em área com avanço de vassoura (*Bacharis* spp.). In: CARPANEZZI, O. T. B.; CAMPOS, J. B. (Org.). **Coletânea de pesquisa: Parque Estadual de Vila Velha, Cerrado e Guartelá**. Curitiba: IAP, 2011. p. 46 - 55.

PAIXÃO, L. G. M. A. **Simulação de comportamento de fogo em zonas florestais no Alentejo Central: comparação de modelos de combustível**. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica) –



Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

PARANÁ. Decreto nº 5767 de 05 de junho de 2002. Amplia a área do Parque Estadual de Vila Velha. **Diário Oficial do Estado**, Curitiba, PR, 05 jun. 2002.

PARANÁ. Lei nº 1293 de 12 de outubro de 1953. Cria, no município de Ponta Grossa, nas terras denominadas “VILA VELHA” e “LAGOA DOURADA”, um parque estadual. **Diário Oficial do Estado**, Curitiba, PR, 16 out. 1953.

PARKS, S. A.; DILLON, G. K.; MILLER, C. A new metric for quantifying burn severity: the relativied burn ratio. **Remote Sensing**, v. 6, p. 1827 – 1844, 2014.

PELLEGRINI, A. F. A.; ANDEREGG, W. R. L.; PAINE, C. E. T.; HOFFMANN, W. A.; KARTZINEL, T.; RABIN, S. S.; SHEIL, D.; FRANCO, A. C.; PACALA, S. W. Convergence of bark investment according to fire and climate structures ecosystem vulnerability to future change. **Ecology letters**, v. 20, p. 307 – 316, 2017.

PEREIRA, J. F.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V. Variação da umidade do material combustível florestal em função de índices de perigo de incêndios. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 3, p. 371 – 376, 2012.

PEREIRA JÚNIOR, A. C.; OLIVEIRA, S. L. J.; PEREIRA, J. M. C.; TURKMAN, M. A. A. Modelling fire frequency in a Cerrado Savanna Protected Area. **Plos One**, v. 9, n. 7, e102380, 2014.

PEREIRA, A. A.; TEIXEIRA, F. R.; LIBONATI, R.; MELCHIORI, E. A.; CARVALHO, L. M. R. Avaliação de índices espectrais para identificação de áreas queimadas no cerrado utilizando dados Landsat TM. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 8, p. 1665-168, 2016.

PIVELLO, V. R. The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforest of Brazil: past and presente. **Fire Ecology**, n. 7, p. 24-39, 2011.

PIVELLO, V. R.; OLIVERAS, I.; MIRANDA, H. S.; HARIDASAN, M.; SATO, M. N.; MEIRELLES, S. T. Effects of fires on soil nutrient availability in an open savanna in Central Brazil. **Plant Soil**, n. 337, p. 111 – 123, 2010.

POWER, M. J. *et al.* Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data. **Clim Dyn**, v. 30, p. 887-907, 2008.

RAMSEY, G. S.; HIGGINS, D. G. **Canadian forest fire statistics**. Ontario: Canadian Forestry Service, 1981. 71p. (Information Report PIX9).

REYES, R. R. **Avaliação do comportamento do fogo em áreas de pastagem e cerrado submetidas a queimas controladas**. 59 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Tocantins, 2017.

RIBEIRO, G.A. **Estudos do comportamento do fogo e de alguns efeitos da queima controlada em povoamentos de *Eucalyptus viminalis* labill em Três Barras, Santa Catarina**. 144f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

RISSI, M. N. **Efeito da época da queima na dinâmica de campo sujo de Cerrado**. 128f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Instituto de Biociências de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2016.

RITTER, L. M. O.; RIBEIRO, M. C.; MORO, R. S. Composição florística e fitofisionomia de remanescentes disjuntos de Cerrado nos Campos Gerais, PR, Brasil – limite austral do bioma. **Biota Neotropica**, Campinas, v. 10, n. 3, p. 379 - 414, 2010.

ROCHA, C. H.; WEIRICH NETO, P. H. Origens do sistema de produção e fragmentação da paisagem nos Campos Gerais. In: MELO, M. S.; MORO, R. S.; GUIMARÃES, G. B (Ed.). **Patrimônio Natural dos Campos Gerais do Paraná**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2007, p. 171 - 179.

RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y. S.; HATSCHBACH, G. G. As unidades fitogeográficas do estado do Paraná, Brasil. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 13, n. 24, p. 75 - 92, 2002,

RODRIGUES, A. **Caracterização do material combustível do estrato herbáceo em área do Parque Estadual de Vila Velha – Paraná como fator de influência na ocorrência de incêndios florestais**. 57f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2018.

RODRIGUES, C. A. S. **Quantas vezes devemos queimar o cerrado? O efeito da frequência do fogo em comunidades vegetais de campo sujo de cerrado**. 88f. Dissertação (Mestrado em Ciências biológicas) - Instituto de Biociências do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019.

RODRIGUES, A.; BIRCKOLZ, C. J.; TETTO, A. F.; SOARES, R. V. Ocorrência de incêndios florestais no Parque Estadual de Vila Velha (Paraná, Brasil) e propostas de prevenção e combate. **Revista Espacios**, v. 38, p. 17, 2017.

ROSSA, C. G.; FERNANDES, P. M. Live fuel, moisture content: the ‘pea under the mattress’ of fire spread rate modeling?. **Fire**, v. 43, n. 1, 2018.

ROTHERMEL, R. C. **A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels**. Ogden: United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 1972. 48p. (Research Paper INT-115).

ROTHERMEL, R. C. **Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains**. Ogden: United States Department of Agriculture,

Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 1991. 52p. (Research Paper INT-438).

ROTHERMEL, R. C.; DEEMING, J. E. **Measuring and interpreting fire behavior for correlation with fire effects**. Ogden, Utah, 1980.

RUS-COPERNICUS. **Burned area mapping with Sentinel-2 using SNAP**. Portugal, 2017. 25p.

SALGADO-LABOURIAU, M. L. Alguns aspectos sobre a paleoecologia dos cerrados. In: SCARIOT, A.; SOUSA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M (Org.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005, 439 p.

SAMPAIO, O. B. **Análise da eficiência de quatro índices, na previsão de incêndios florestais para a região de Agudos – SP**. 157f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

SANTOS, J. F. L. dos. **Estimativa do teor de umidade da estepe gramíneo-lenhosa para uso em índices de perigo de incêndios florestais**. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SCHMIDT, I. B.; FIDELIS, A.; MIRANDA, H. S.; TICKTIN, T. How do the wets burn? Fire behavior and intensity in wet grasslands in the Brazilian savanna. **Brazilian Journal of Botany**, v. 40, p. 167 – 175, 2017.

SCHMIDT, I. B.; FONSECA, C. B.; FERREIRA, M. C.; SATO, M. N. Implementação do programa piloto de manejo integrado do fogo em três unidades de conservação do Cerrado. **Biodiversidade Brasileira**, Brasília, v. 6, n. 2, p. 55 – 7, 2016a.

SCHMIDT, I. B.; FONSECA, C. B.; FERREIRA, M. C.; SATO, M. N. Experiências internacionais de manejo integrado do fogo em áreas protegidas – recomendações para implementação de manejo integrado de fogo no Cerrado. **Biodiversidade Brasileira**, Brasília, v. 6, n. 2, p. 41 – 54, 2016b.

SCHMIDT, I. B.; MOURA, L. C.; FERREIRA, M. C.; ELOY, L.; SAMPAIO, A. B.; DIAS, P. A.; BERLINCK, C. N. Fire management in the Brazilian savanna: first steps and the way forward. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, p. 2094-2101, 2018.

SCOTT, J. H.; BURGAN, R. E. **Standard fire behavior fuel models: A comprehensive set for use with Rothermel's Surface Fire Spread Model**. CO: United States Department of Agriculture, Forest Service, 2005, 72p. (Report RMRS-GTR-153).

SCOTT, K.; SETTERFIELD, S. A.; DOUGLAS, M. M.; PARR, C. L.; SCHATZ, J.; ANDERSEN, A. N. Does long-term fire exclusion in an Australian tropical

savanna result in a biome shift? A test using the reintroduction of fire. **Austral Ecology**, v. 37, n. 6, p. 693 - 711, 2012.

SEGER, C. D. **Material combustível da vegetação de estepe do Parque Estadual de Vila Velha, Ponta Grossa – Paraná**. 63 f. Relatório (Pós-Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2016.

SEGER, C. D. **Material combustível e comportamento do fogo em vegetação de estepe gramíneo-lenhosa na RPPN Caminho das Tropas, Palmeira, Paraná**. 2015. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SEGER, C. D.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F.; SOARES, R. V. Comportamento do fogo em queimas controladas de vegetação de estepe no município de Palmeira, Paraná, Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 4, p. 547 - 558, 2013.

SEGER, C. D.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F.; SOARES, R. V.; BIONDI, D. Caracterização do material combustível fino da estepe gramíneo-lenhosa no estado do Paraná, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 863 – 874, 2018.

SHLISKY, A.; WAUGH, J.; CONZALEZ, P.; GONZALEZ, M.; MANTA, M.; SANTOSO, H.; ALVARADO, E.; NURUDDIN, A. A.; RODRÍGUEZ-TREJO, D. A.; SWATY, R.; SCHMIDT, D.; KAUFMANN, M.; MYERS, R.; ALENCAR, A.; KEARNS, F.; JOHNSON, D.; SMITH, J.; ZOLLNER, D. **Fire, ecosystems and people: threats and strategies for global biodiversity conservation**. Sevilla, España, Wildfire, 2007.

SILVA, A. R. da. **Florística, fitossociologia e fenologia de três fitofisionomias campestres no Parque Estadual de Vila Velha, Ponta Grossa, Paraná**. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SILVA, C. S.; FONTOURA, S. C. C.; SILVA, M. B. O.; BERLINCK, C. N. Manejo integrado do fogo: tendências e resultados preliminares em unidades de conservação federais. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE INCÊNDIOS FLORESTAIS, 7., 2019, Campo Grande. **Resumos...** Brasília: ICMBIO, 2019. p. 127.

SILVA, D. M. da.; LOIOLA, P. P.; ROSATTI, N. B.; SILVA, I. A.; CIANCIARUSO, M. V.; BATALHA, M. A. Os efeitos dos regimes de fogo sobre a vegetação de cerrado no Parque Nacional das Emas, GO: Considerações para a conservação da diversidade. **Biodiversidade Brasileira**, v. 1, n. 2, p. 26 – 39, 2011.

SILVA, E. D. N. da.; LUDKA, V. M. Geografia no campo: uma proposta para a rota do Rosário no Norte Pioneiro e Campos Gerais Paranaense. **Geografia Ensino e Pesquisa**, v. 23, p. e37, 2019.

SILVA, E. C. G.; FIEDLER, N. C.; JUVANHOL, R. S.; SILVA, G. M. A.; NEVES, F. P. Análise temporal da ocorrência de incêndios florestais nas Américas e região do Caribe. **Nativa**, Sinop, v. 6, n. 5, p. 491-496, 2018.

SILVA, L. G. da. **Comportamento e efeito do fogo sobre os ecossistemas do bioma cerrado**: modelos baseados em processos. 123 f. Tese (Doutorado em Ecologia) - Universidade Federal de Brasília, 2018.

SISTEMA METEOROLÓGICO DO PARANÁ (SIMEPAR). **Dados meteorológicos de Ponta Grossa**: 2017. Curitiba: SIMEPAR, 2017. (Banco de dados).

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F. **Incêndios florestais**: controle, efeitos e uso do fogo (2. ed). Curitiba, 2017, 250 p.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F. **Meteorologia e climatologia florestal** (2. ed). Curitiba, 2015, 215 p.

SOUZA, L. J. B. de.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Modelagem do material combustível superficial em povoamentos de *Eucalyptus dunnii*, em Três Barras, SC. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 231 – 245, 2003.

SOW, M.; HÉLY, C.; MBOW, C.; SAMBOU, B. Fuel and fire behavior analysis for early-season prescribed fire planning in Sudanian and Sahelian savanas. **Journal of Arid Environments**, v. 89, p. 84 – 93, 2013.

STRATTON, R. D. **Guidebook on landfire fuels data acquisition, critique, modification, maintenance, and model calibration**. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2009, 54 p. (Gen. Tech. Rep RMRS-GTR-220).

SYSBM – CCB. Cascavel: Corpo de Bombeiros Cascavel. **Registro de ocorrência de incêndio**: Parque Estadual de Vila Velha, 2017.

TETTO, A. F.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V. Ocorrência de incêndios florestais no estado do Paraná, no período de 2005 a 2010. **Floresta**, v. 42, p. 391-398, 2012.

TORRES, F. T. P.; LIMA, G. S.; COSTA, A. G.; FÉLIX, G. A.; SILVA JÚNIOR, M. R. Perfil dos incêndios florestais em unidades de conservação brasileiras no período de 2008 a 2012. **Floresta**, Curitiba, v. 46, n. 4, p. 531 – 542, 2016.

TORRES, F. T. P.; SILVA JUNIOR, M. R. da.; LIMA, G. S. Influence of weather on fire behavior. **Revista brasileira de meteorologia**, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 33 – 41, 2019.

TRES, A.; TETTO, A. F.; SOARES, R. V.; WENDLING, W. T.; SANTOS, G. H. Ecological Life Zones of Brazil. **Floresta**, v. 50, n. 3, p. 1575 – 1584, 2020.

TRINDADE, W. C. F.; IARMUL, J. O uso de imagens de satélite Sentinel-2 na análise de impactos ambientais: um caso de incêndios no Parque Estadual de Vila Velha, Ponta Grossa, Paraná. In: SEMANA DE GEOGRAFIA UEPG, 25., 2018, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: UEPG, 2018.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Earth Explorer**: imagens de satélites *Landsat*, 2019

VAN WAGNER, C. E. Conditions for the start and spread of crown fire, **Canadian Journal of Forest Research**, v. 7, n. 1, p. 23 – 34, 1977.

VÉLEZ, R. M. Combustibles forestales: combustibilidad. In: VÉLEZ, R. M. (Coord.). **La defensa contra incendios forestales**: fundamentos y experiencias. Madrid: McGRAW-HILL, 2009. p. 7.1 - 7.15.

VINEY, N. R. A review of fine fuel moisture modelling. **International Journal of wildland fire**, v. 1, n. 4, p. 215 – 234, 1991.

WHITE, B. L. A. Modelos matemáticos de previsão do teor de umidade dos materiais combustíveis florestais finos e mortos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 432 – 445, 2018.

WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, A. S.; WHITE, L. A. S.; RIBEIRO, G. T. Caracterização do material combustível superficial no Parque Nacional Serra de Itabaiana – Sergipe, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 699 – 706, 2014.

WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, G. T.; SOUZA, R. M. Caracterização do material combustível e simulação do comportamento do fogo em eucaliptais no litoral norte da Bahia, Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 1, p. 33 – 42, 2014.

WHITE, B. L. A.; WHITE, L. A. S.; RIBEIRO, G. T.; SOUZA, R. M. Empirical models for describing fire behavior in brazilian commercial eucalypt plantations. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 4, p. 397 - 406, 2016.

WHITLOCK, C.; HIGUERA, P. E.; McWENTHY, D. B.; BRILES, C. E. Paleoeological perspectives on fire ecology: revisiting the fire-regime concept. **The Open Ecology Journal**, v. 3, n. 2, p. 6 - 23, 2010.

WILGEN, B. W. The evolution of fire management practices in savanna protected areas in South Africa. **South African Journal of Science**, n. 105, p. 343 – 349, 2009.

WITTKUHN, R. S.; HAMILTON, T. Using fire history data to map temporal sequences of fire return intervals and seasons. **Fire Ecology**, v. 6, n. 2, p. 97 – 114, 2010.

ZHANG, R.; HU, H.; QU, Z.; HU, T. Diurnal variation models for fine fuel moisture content in boreal forest in China. **Journal os Forestry Research**, 2020.



ZHENG, Z.; HUANG, W.; LI, S.; ZENG, Y. Forest fire spread simulating model using cellular automaton with extreme learning machine. **Ecological Modelling**, v. 348, p. 33 – 43, 2017.

ZILLER, S. R. A **Estepe gramíneo-lenhosa no segundo planalto do Paraná:** diagnóstico ambiental com enfoque à contaminação biológica. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

## APÊNDICE 1 - VALORES POR AMOSTRA DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO E CONSUMO

Parcela	Sub Parcela	Amostra	Material Combustível					
			Massa úmida (kg.m <sup>-2</sup> )	Massa seca (kg.m <sup>-2</sup> )	Teor de umidade (%)	Residual (kg.m <sup>-2</sup> )	Consumido (kg.m <sup>-2</sup> )	Consumido (%)
A	1	1	1,41	1,01	39,36	0,28	1,13	80,46
		2	1,55	1,21	27,63	0,97	0,58	37,64
		3	3,52	2,34	50,70	0,08	3,44	97,66
	6	1	0,96	0,74	29,83	0,17	0,79	82,00
		2	1,06	0,87	22,83	0,29	0,78	73,00
		3	1,86	1,23	51,84	0,94	0,92	49,30
	8	1	1,48	0,99	49,37	0,59	0,89	60,17
		2	0,99	0,58	70,26	0,26	0,73	73,49
		3	1,92	1,21	58,59	0,38	1,54	80,30
	9	1	1,42	0,95	50,13	0,17	1,26	88,40
		2	1,30	0,99	31,47	0,10	1,19	92,08
		3	0,98	0,61	60,91	0,14	0,84	85,68
	Média			1,54	1,06	45,24	0,36	1,17
B	1	1	0,37	0,27	38,68	0,28	0,09	23,13
		2	1,31	0,92	42,78	0,40	0,91	69,27
		3	0,59	0,47	24,87	0,33	0,27	44,92
	3	1	0,79	0,60	32,35	0,15	0,64	81,27
		2	0,67	0,48	40,00	0,35	0,32	47,37
		3	1,20	1,03	17,07	0,67	0,54	44,58
	4	1	0,75	0,58	29,74	0,29	0,47	61,79
		2	1,11	0,83	34,04	0,08	1,04	93,26
		3	1,12	0,90	23,82	0,14	0,98	87,70
	6	1	0,87	0,66	32,20	0,43	0,44	50,72
		2	0,74	0,50	49,49	0,42	0,32	43,58
		3	0,57	0,44	28,25	0,38	0,19	33,48
	8	1	1,19	0,92	29,16	0,27	0,92	77,43
		2	1,27	0,94	34,84	0,10	1,17	91,91
		3	1,84	1,30	42,28	0,53	1,32	71,37
	9	1	1,10	0,81	36,53	0,17	0,94	84,81
		2	0,95	0,58	64,22	0,31	0,64	67,45
		3	0,67	0,47	44,09	0,50	0,17	25,37
	Média			0,95	0,70	35,80	0,45	0,64
C	2	1	0,93	0,71	30,18	0,12	0,81	87,60
		2	1,06	0,77	37,01	0,32	0,74	70,14
		3	0,56	0,39	43,31	0,10	0,46	81,78
	3	1	0,77	0,54	42,33	0,10	0,67	87,58
		2	0,30	0,20	47,50	0,12	0,18	60,17
		3	0,91	0,73	23,89	0,21	0,70	76,86
	5	1	0,74	0,59	25,53	0,13	0,61	83,05
		2	1,55	1,35	14,42	0,09	1,46	94,18
		3	0,70	0,53	32,86	0,16	0,54	77,42
	6	1	1,03	0,84	21,66	0,28	0,75	72,93
		2	0,88	0,70	25,81	0,14	0,74	84,05
		3	1,48	1,11	32,58	0,19	1,28	86,95
	8	1	0,40	0,33	20,45	0,10	0,30	74,21
		2	1,55	1,30	19,42	0,11	1,44	92,91
		3	1,00	0,76	32,78	0,25	0,75	75,06
	9	1	0,66	0,54	21,66	0,37	0,29	43,60
		2	0,99	0,78	27,65	0,19	0,80	80,60
		3	1,04	0,85	22,71	0,51	0,53	50,96
	Média			0,92	0,72	28,99	0,21	0,74

APÊNDICE 2 – CORRELAÇÃO DE SPEARMAN ENTRE OS PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO DO FOGO, CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL COMBUSTÍVEL E VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

continua

	Altura de chama (cm)	Velocidade de fogo (m.s <sup>-1</sup> )	Intensidade do fogo (kcal.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	Poder calorífico (kcal.kg <sup>-1</sup> )	Calor liberado (kcal.m <sup>-2</sup> )
Altura de chama (cm)		-0,1275 -16 0,6215	0,1383 -16 0,5921	0,1354 -16 0,6	0,1913 -16 0,4587
Velocidade de fogo (m.s <sup>-1</sup> )	-0,1275 -16 0,6215		0,4669 -16 0,0706	0,2445 -16 0,3437	-0,2239 -16 0,3859
Intensidade do fogo (kcal.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	0,1383 -16 0,5921	0,4669 -16 0,0706		0,2853 -16 0,2692	0,7176 -16 0,0054
Poder calorífico (kcal.kg <sup>-1</sup> )	0,1354 -16 0,6	0,2445 -16 0,3437	0,2853 -16 0,2692		0,1618 -16 0,531
Calor liberado (kcal.m <sup>-2</sup> )	0,1913 -16 0,4587	-0,2239 -16 0,3859	0,7176 -16 0,0054	0,1618 -16 0,531	
TU do combustível (%)	-0,1414 -16 0,584	-0,2491 -16 0,3347	-0,2723 -16 0,2917	-0,9993 -16 0,0001	-0,1428 -16 0,5803
Combustível consumido (kg.m <sup>-2</sup> )	0,1163 -16 0,6525	-0,327 -16 0,2054	0,6324 -16 0,0143	-0,1294 -16 0,6162	0,9441 -16 0,0003
Combustível consumido (%)	0,3355 -16 0,1938	-0,5979 -16 0,0206	0,2588 -16 0,3161	0,1971 -16 0,4453	0,7412 -16 0,0041
Massa úmida (kg.m <sup>-2</sup> )	-0,0353 -16 0,8911	0,0295 -16 0,9091	0,7712 -16 0,0028	-0,1266 -16 0,624	0,8418 -16 0,0011
Velocidade do vento (m.s <sup>-1</sup> )	-0,6 -16 0,0201	0,2592 -16 0,3154	-0,1799 -16 0,4859	-0,115 -16 0,6559	-0,2729 -16 0,2906
Temperatura do ar (°C)	-0,6487 -16 0,012	0,6271 -16 0,0151	0,0515 -16 0,8419	0,0677 -16 0,7932	-0,4032 -16 0,1184
Umidade relativa do ar (%)	0,5979 -16 0,0206	-0,6573 -16 0,0109	-0,131 -16 0,612	-0,1928 -16 0,4553	0,365 -16 0,1575
DVA (mb)	-0,5972 -16 0,0207	0,6743 -16 0,009	0,1118 -16 0,6649	0,1251 -16 0,628	-0,39 -16 0,1309

NOTA: TU – teor de umidade; DVA - déficit de pressão de vapor d' água.

Primeiro valor: coeficiente de correlação entre as variáveis, que variam de -1 a +1;

Segundo valor: número de pares de valores de dados usados para calcular cada coeficiente;

Terceiro valor: valor P que testa a significância estatística das correlações estimadas. Valores de p abaixo de 0,05 indicam correlações não-estatisticamente significativas no nível de confiança de 95,0%.

APÊNDICE 2 – CORRELAÇÃO DE SPEARMAN ENTRE OS PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO DO FOGO, CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL COMBUSTÍVEL E VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

continua

	TU do combustível (%)	Combustível consumido (kg.m <sup>-2</sup> )	Combustível consumido (%)	Massa úmida (kg.m <sup>-2</sup> )
Altura de chama (cm)	-0,1414 -16 0,584	0,1163 -16 0,6525	0,3355 -16 0,1938	-0,0353 -16 0,8911
Velocidade de fogo (m.s <sup>-1</sup> )	-0,2491 -16 0,3347	-0,327 -16 0,2054	-0,5979 -16 0,0206	0,0295 -16 0,9091
Intensidade do fogo (kcal.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	-0,2723 -16 0,2917	0,6324 -16 0,0143	0,2588 -16 0,3161	0,7712 -16 0,0028
Poder calorífico (kcal.kg <sup>-1</sup> )	-0,9993 -16 0,0001	-0,1294 -16 0,6162	0,1971 -16 0,4453	-0,1266 -16 0,624
Calor liberado (kcal.m <sup>-2</sup> )	-0,1428 -16 0,5803	0,9441 -16 0,0003	0,7412 -16 0,0041	0,8418 -16 0,0011
TU do combustível (%)		0,1486 -16 0,5648	-0,184 -16 0,4762	0,1429 -16 0,5801
Combustível consumido (kg.m <sup>-2</sup> )	0,1486 -16 0,5648		0,7029 -16 0,0065	0,9007 -16 0,0005
Combustível consumido (%)	-0,184 -16 0,4762	0,7029 -16 0,0065		0,4327 -16 0,0938
Massa úmida (kg.m <sup>-2</sup> )	0,1429 -16 0,5801	0,9007 -16 0,0005	0,4327 -16 0,0938	
Velocidade do vento (m.s <sup>-1</sup> )	0,1196 -16 0,6433	-0,2153 -16 0,4043	-0,3687 -16 0,1533	0,0561 -16 0,828
Temperatura do ar (°C)	-0,0722 -16 0,7799	-0,3709 -16 0,1509	-0,6152 -16 0,0172	-0,0118 -16 0,9636
Umidade relativa do ar (%)	0,1996 -16 0,4396	0,3709 -16 0,1509	0,5416 -16 0,0359	0,0236 -16 0,9273
DVA (mb)	-0,1311 -16 0,6117	-0,3753 -16 0,1461	-0,5769 -16 0,0255	-0,014 -16 0,9568

NOTA: TU – teor de umidade; DVA - déficit de pressão de vapor d'água.

Primeiro valor: coeficiente de correlação entre as variáveis, que variam de -1 a +1;

Segundo valor: número de pares de valores de dados usados para calcular cada coeficiente;

Terceiro valor: valor P que testa a significância estatística das correlações estimadas.

Valores de p abaixo de 0,05 indicam correlações não-estatisticamente significativas no nível de confiança de 95,0%.

APÊNDICE 2 – CORRELAÇÃO DE SPEARMAN ENTRE OS PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO DO FOGO, CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL COMBUSTÍVEL E VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

conclusão

	Velocidade do vento (m.s <sup>-1</sup> )	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)	DVA (mb)
Altura de chama (cm)	-0,6 -16 0,0201	-0,6487 -16 0,012	0,5979 -16 0,0206	-0,5972 -16 0,0207
Velocidade de fogo (m.s <sup>-1</sup> )	0,2592 -16 0,3154	0,6271 -16 0,0151	-0,6573 -16 0,0109	0,6743 -16 0,009
Intensidade do fogo (kcal.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	-0,1799 -16 0,4859	0,0515 -16 0,8419	-0,131 -16 0,612	0,1118 -16 0,6649
Poder calorífico (kcal.kg <sup>-1</sup> )	-0,115 -16 0,6559	0,0677 -16 0,7932	-0,1928 -16 0,4553	0,1251 -16 0,628
Calor liberado (kcal.m <sup>-2</sup> )	-0,2729 -16 0,2906	-0,4032 -16 0,1184	0,365 -16 0,1575	-0,39 -16 0,1309
TU do combustível (%)	0,1196 -16 0,6433	-0,0722 -16 0,7799	0,1996 -16 0,4396	-0,1311 -16 0,6117
Combustível consumido (kg.m <sup>-2</sup> )	-0,2153 -16 0,4043	-0,3709 -16 0,1509	0,3709 -16 0,1509	-0,3753 -16 0,1461
Combustível consumido (%)	-0,3687 -16 0,1533	-0,6152 -16 0,0172	0,5416 -16 0,0359	-0,5769 -16 0,0255
Massa úmida (kg.m <sup>-2</sup> )	0,0561 -16 0,828	-0,0118 -16 0,9636	0,0236 -16 0,9273	-0,014 -16 0,9568
Velocidade do vento (m.s <sup>-1</sup> )		0,7159 -16 0,0056	-0,6007 -16 0,02	0,6627 -16 0,0103
Temperatura do ar (°C)	0,7159 -16 0,0056		-0,9647 -16 0,0002	0,9853 -16 0,0001
Umidade relativa do ar (%)	-0,6007 -16 0,02	-0,9647 -16 0,0002		-0,9897 -16 0,0001
DVA (mb)	0,6627 -16 0,0103	0,9853 -16 0,0001	-0,9897 -16 0,0001	

NOTA: TU – teor de umidade; DVA - déficit de pressão de vapor d'água.

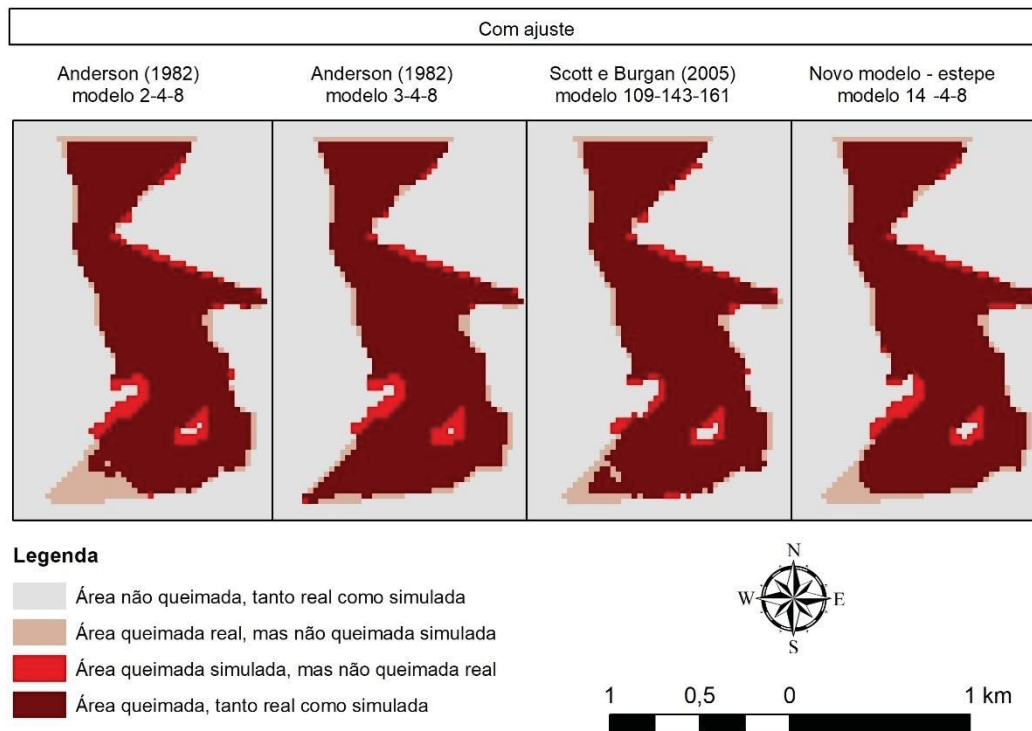
Primeiro valor: coeficiente de correlação entre as variáveis, que variam de -1 a +1;

Segundo valor: número de pares de valores de dados usados para calcular cada coeficiente;

Terceiro valor: valor P que testa a significância estatística das correlações estimadas.

Valores de p abaixo de 0,05 indicam correlações não-estatisticamente significativas no nível de confiança de 95,0%.

APÊNDICE 3 – ESPACIALIZAÇÃO DA ÁREA REAL E SIMULADA UTILIZADA PARA CÁLCULO DE *SKILL SCORE* E PORCENTAGEM DE SUCESSO DE MODELOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS





# APÊNDICE 4 – CÁLCULO DE *SKILL SCORE* E PORCENTAGEM DE SUCESSO DE MODELOS DE COMBUSTÍVEIS AJUSTADOS

COM AJUSTE				
ANDERSON (1982) 2-4-8				
REAL				
	QUEIMADO	NÃO QUEIMADO	TOTAL	
SIMULADO	QUEIMADO	1208	102	1310
	NÃO QUEIMADO	173	2621	2794
	TOTAL	1381	2723	4104
REAL				
	QUEIMADO	NÃO QUEIMADO	TOTAL	
SIMULADO	QUEIMADO	0,8747	0,0375	0,9122
	NÃO QUEIMADO	0,1253	0,9625	1,0878
	TOTAL	1	1	2

N	4104
G	3829
H	2294,6326
p	0,3365
q	0,3192
<b>SS</b>	<b>0,8480</b>
<b>PS</b>	<b>0,9330</b>

COM AJUSTE				
NOVO MODELO - ESTEPE (14*-4-8)				
REAL				
	QUEIMADO	NÃO QUEIMADO	TOTAL	
SIMULADO	QUEIMADO	1232	88	1320
	NÃO QUEIMADO	149	2635	2784
	TOTAL	1381	2723	4104
REAL				
	QUEIMADO	NÃO QUEIMADO	TOTAL	
SIMULADO	QUEIMADO	0,8921	0,0323	0,9244
	NÃO QUEIMADO	0,1079	0,9677	1,0756
	TOTAL	1	1	2

N	4104
G	3867
H	2291,3626
p	0,3365
q	0,3216
<b>SS</b>	<b>0,8693</b>
<b>PS</b>	<b>94,2251</b>

COM AJUSTE				
ANDERSON (1982) 3-4-8				
REAL				
	QUEIMADO	NÃO QUEIMADO	TOTAL	
SIMULADO	QUEIMADO	1257	91	1348
	NÃO QUEIMADO	124	2632	2756
	TOTAL	1381	2723	4104
REAL				
	QUEIMADO	NÃO QUEIMADO	TOTAL	
SIMULADO	QUEIMADO	0,9102	0,0334	0,9436
	NÃO QUEIMADO	0,0898	0,9666	1,0564
	TOTAL	1	1	2

N	4104
G	3889
H	2282,2066
p	0,3365
q	0,3285
<b>SS</b>	<b>0,8820</b>
<b>PS</b>	<b>0,9476</b>

COM AJUSTE				
SCOTT E BURGAN (2005) 109-143-161				
REAL				
	QUEIMADO	NÃO QUEIMADO	TOTAL	
SIMULADO	QUEIMADO	1247	77	1324
	NÃO QUEIMADO	134	2646	2780
	TOTAL	1381	2723	4104
REAL				
	QUEIMADO	NÃO QUEIMADO	TOTAL	
SIMULADO	QUEIMADO	0,9030	0,0283	0,9312
	NÃO QUEIMADO	0,0970	0,9717	1,0688
	TOTAL	1	1	2

N	4104
G	3893
H	2290,0546
p	0,3365
q	0,3226
<b>SS</b>	<b>0,8837</b>
<b>PS</b>	<b>0,9486</b>

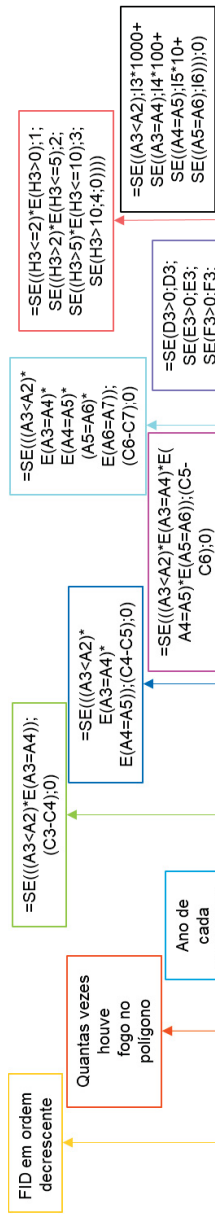
APÊNDICE 5 – CÁLCULO DA SUFICIÊNCIA AMOSTRAL (N) PARA AS CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO EM PARCELAS DE QUEIMA CONTROLADA E DE INCÊNDIO

Período de coleta	Número de parcelas amostradas	Classe	Suficiência de amostragem (N)					
			Média (Mg.ha <sup>-1</sup> )	Desvio	s <sup>2</sup>	t <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	N
Nov/Dez de 2017 3 meses pós-fogo	9	Material vivo	6,61	1,55	2,39	1,95	1,75	3
		Material morto	0,00	0,00	0,00	1,95	0,00	-
		Miscelânea	0,19	0,08	0,01	1,95	0,00	9
		TOTAL	6,80	1,55	2,39	1,95	1,85	3
Fev/Mar de 2018 6 meses pós-fogo	18	Material vivo	9,04	2,10	4,40	1,78	3,27	2
		Material morto	2,18	0,86	0,73	1,78	0,19	7
		Miscelânea	0,64	0,25	0,06	1,78	0,02	7
		TOTAL	11,87	2,08	4,31	1,78	5,63	1
Jun/Jul de 2018 10 meses pós-fogo	27	Material vivo	5,08	1,45	2,10	1,73	1,03	4
		Material morto	3,51	0,82	0,67	1,73	0,49	2
		Miscelânea	0,59	0,22	0,05	1,73	0,01	6
		TOTAL	9,18	1,73	2,98	1,73	3,37	2
Set/Out de 2018 13 meses pós-fogo	27	Material vivo	6,83	2,22	4,93	1,73	1,87	5
		Material morto	3,38	0,93	0,87	1,73	0,46	3
		Miscelânea	0,97	0,50	0,25	1,73	0,04	11
		TOTAL	11,18	2,60	6,78	1,73	5,00	2
Mar/Abr de 2019 19 meses pós-fogo	27	Material vivo	6,67	2,99	8,95	1,73	1,78	9
		Material morto	4,81	2,52	6,33	1,73	0,92	12
		Miscelânea	1,97	1,39	1,94	1,73	0,16	22
		TOTAL	13,45	5,09	25,86	1,73	7,24	6

# ANEXO 1 – EXEMPLIFICAÇÃO DO CÁLCULO PARA O INTERVALO DE RETORNO DE FOGO

continua

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
FID	FREQUENCIA	ANO	INTERVALO_1	INTERVALO_2	INTERVALO_3	INTERVALO_4	ALLINT	INTTYPE	FISEQ	CLASSIFICACAO
362	0	1999	0	0	0	0	0	0	0	SEM FOGO
361	5	2009	2	0	0	0	2	1	1221	CURTO
361	5	2007	0	4	0	0	4	2	0	0
361	5	2003	0	0	4	0	4	2	0	0
361	5	1999	0	0	0	2	2	1	0	0
361	5	1997	0	0	0	0	0	0	0	0
360	1	2010	0	0	0	0	0	0	INCOMPLETO	INCOMPLETO
359	1	2011	0	0	0	0	0	0	INCOMPLETO	INCOMPLETO
358	2	2011	12	0	0	0	12	4	4000	ÚNICO-LONGO
358	2	1999	0	0	0	0	0	0	0	0
357	1	2011	0	0	0	0	0	0	INCOMPLETO	INCOMPLETO
356	2	2011	12	0	0	0	12	4	4000	ÚNICO-LONGO
356	2	1999	0	0	0	0	0	0	0	0
355	3	2011	12	0	0	0	12	4	4100	MISTO
355	3	1999	0	2	0	0	2	1	0	0
355	3	1997	0	0	0	0	0	0	0	0



FONTE: WITTKUHN; HAMILTON (2010), adaptado pela autora (2020).

Legenda: FID = ID do polígono gerado pelo Arcgis no momento de união dos *shapefiles*; ALLINT = Intervalos, em anos, entre cada ocorrência de fogo; INTTYPE = Os intervalos classificados segundo os códigos: 1 (período entre incêndios/queimas <= 2 anos), 2 (período entre incêndios/queimas <= 5 anos), 3 (período entre incêndios/queimas <= 10 anos), e 4 – (período entre incêndios/queimas > 10 anos); FISEQ = sequência resultante após a codificação.

NOTA: considerou-se uma frequência máxima de fogo igual a 5.

ANEXO 1 – EXEMPLIFICAÇÃO DO CÁLCULO PARA O INTERVALO DE RETORNO DE FOGO

conclusão

A linha final de um grupo espacial sempre resultará em "0", pois o número de intervalos de fogo é a frequência máxima observada (5) menos 1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	FID	FREQUENCIA	ANO	INTERVALO_1	INTERVALO_2	INTERVALO_3	INTERVALO_4	ALLINT	INTTYPE	FISEQ	CLASSIFICACAO
2	362	0	1999	0	0	0	0	0	0	0	SEM FOGO
3	361	5	2009	2	0	0	0	2	1	1221	CURTO
4	361	5	2007	0	4	0	0	4	2	0	0
5	361	5	2003	0	0	4	0	4	2	0	0
6	361	5	1999	0	0	0	2	2	1	0	0
7	361	5	1997	0	0	0	0	0	0	0	0
8	360	1	2010	0	0	0	0	0	0	INCOMPLETO	INCOMPLETO
9	359	1	2011	0	0	0	0	0	0	INCOMPLETO	INCOMPLETO
10	358	2	2011	12	0	0	0	12	4	4000	ÚNICO-LONGO
11	358	2	1999	0	0	0	0	0	0	0	0
12	357	1	2011	0	0	0	0	0	0	INCOMPLETO	INCOMPLETO
13	356	2	2011	12	0	0	0	12	4	4000	ÚNICO-LONGO
14	356	2	1999	0	0	0	0	0	0	0	0
15	355	3	2011	12	0	0	0	12	4	4100	MISTO
16	355	3	1999	0	2	0	0	2	1	0	0
17	355	3	1997	0	0	0	0	0	0	0	0

Neste primeiro momento os "0" são inseridos, em vez de uma função.

Há duas colunas de zeros (INTERVALO\_3 e INTERVALO\_4), pois o FID 355 apresenta somente dois intervalos.

J13:  
O valor de 4000 representa que houve somente um intervalo de fogo, no caso de classificado como "longo" (4). Os zeros fornecem uma informação adicional: o máximo de números de intervalos obtidos, no caso quatro.

Grupo espacial

FONTE: WITTKUHN; HAMILTON (2010), adaptado pela autora (2020).  
Legenda: FID = ID do polígono gerado pelo Arcgis no momento de união dos *shapefiles*; ALLINT = Intervalos, em anos, entre cada ocorrência de fogo; INTTYPE = Os intervalos classificados segundo os códigos: 1 (período entre incêndios/queimas <= 2 anos), 2 (período entre incêndios/queimas <= 5 anos), 3 (período entre incêndios/queimas <= 10 anos), e 4 – (período entre incêndios/queimas > 10 anos); FISEQ = sequência resultante após a codificação.  
NOTA: considerou-se uma frequência máxima de fogo igual a 5.